

# Materiaalia pursottavan valmistuksen mittatarkkuuden arviointi

Kuluttajataso tulostin

Tommi Lamberg

Opinnäytetyö  
kesäkuu 2015

Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma  
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU  
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) LAMBERG, Tommi	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 3.6.2015
	Sivumäärä 44	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: <input checked="" type="checkbox"/>
Työn nimi <b>Materiaalia pursottavan valmistuksen mittatarkkuuden arviointi</b> Kuluttajatasen tulostin		
Koulutusohjelma <b>Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma</b>		
Työn ohjaaja(t) Siistonen Matti, Jaaranen Kalevi		
Toimeksiantaja(t) ProSolve Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli arvioida materiaalia pursottavan valmistuksen mittatarkkuutta kuluttajatasen tulostimella. Opinnäytetyön tavoitteena oli myös tutkia x- ja y-akselin mittojen eroavaisuuksia. Työssä tutkittiin ainoastaan PLA materiaalista tulostettuja kappaleita.</p> <p>Opinnäytetyössä esitellään eri valmistusmenetelmiä sekä materiaalia pursottavan valmistuksen tulostuslaatuun vaikuttavia parametreja. Työssä suunniteltiin ja valmistettiin mitauskappaleet sisä- ja ulkomitoille ympyrä ja neliö profiileilla. Saatua tuloksia arvioitiin ja havainnointiin hajontakuvioiden avulla.</p> <p>Tulostimen mittatarkkuudeksi arvioitiin 0-20 millimetrin kokoisilla kappaleilla <math>\pm 0,4</math> millimetriä. Alle kahden millimetrin kokoisien mittatarkkojen osien valmistusta tulisi välttää. Y-akselin arvot ovat aina x-akselia korkeampia.</p> <p>Opinnäytetyön avulla pystytään arvioimaan paremmin laitteiston toimintaa ja ennakoimaan jo suunnitteluvaiheessa mittaerot. Jatkotoimenpiteinä luotua menetelmää tulisi yksinkertaistaa sekä mitattavien halkaisijoiden kokoa kasvattaa.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) pikavalmistus, pituudenmittaus		
Muut tiedot		



Author(s) LAMBERG, Tommi	Type of publication Bachelor's thesis	Date 3.6.2015
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 44	Permission for web publication: <input checked="" type="checkbox"/>
Title of publication Measurement accuracy of material extrusion Consumer printer		
Degree programme Bachelor of Engineering		
Tutor(s) Siistonen, Matti, Jaaranen Kalevi		
Assigned by ProSolve Oy		
<p>Abstract</p> <p>The aim of this Bachelor's thesis was to measure the accuracy of material extrusion with a consumer 3D-printer. The aim was also to research differences between x-axle and y-axle. This thesis only deals with parts printed of PLA material.</p> <p>In this thesis manufacturing methods are introduced and the parameters which are affecting to dimensional accuracy of the material extrusion. Gauge blocks were designed and manufactured with square and circle profiles. Given results were reviewed and analyzed from scatterplots.</p> <p>The dimensional accuracy of parts, from 0 to 20 mm, were estimated to <math>\pm 0,4\text{mm}</math>. One should avoid printing parts sized under two millimeters. Measurements of y-axle were always bigger than x-axle.</p> <p>Based on the thesis one is more able to estimate the functioning of the printer. It is also easier to change dimensions during the design process. Future research could be done by simplifying the process and adding more diameters.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) rapid manufacturing, length measurement		
Miscellaneous		

## Sisällysluettelo

Käytetyt lyhenteet .....	2
<b>1 Johdanto .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Materiaalia lisäävä valmistus .....</b>	<b>4</b>
2.1 Historia .....	4
2.2 Menetelmät .....	5
2.3 Hyödyt & haasteet .....	9
2.4 Käyttökohteet .....	10
2.5 Tulevaisuus.....	12
<b>3 Mallista tulosteeksi .....</b>	<b>13</b>
3.1 Suunnittelu.....	14
3.2 STL käännös.....	15
3.3 Viipalointi .....	16
3.4 Jälkikäsittely .....	16
<b>4 Kuluttajatasen tulostimet .....</b>	<b>16</b>
<b>5 Mittatarkkuus.....</b>	<b>18</b>
5.1 Tulostimen mittatarkkuus.....	18
<b>6 Pituuden mittaamenetelmät .....</b>	<b>20</b>
6.1 Työntömitta .....	21
<b>7 Mittausvirheet.....</b>	<b>22</b>
<b>8 Tilastolliset menetelmät .....</b>	<b>22</b>
<b>9 Tutkimus .....</b>	<b>24</b>
<b>10 Tutkimuksen tulokset.....</b>	<b>28</b>
10.1 Ulkomitat .....	29
10.1.1 Neliö.....	29
10.1.2 Ympyrä .....	31
10.2 Sisämitat .....	32
10.2.1 Neliö.....	32
10.2.2 Ympyrä .....	34
<b>11 Tulosten tarkastelu .....</b>	<b>36</b>
<b>12 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet.....</b>	<b>37</b>
<b>13 Pohdinta .....</b>	<b>37</b>
<b>Lähteet.....</b>	<b>39</b>
<b>Liitteet.....</b>	<b>41</b>
<b>Liite 1 Tulostusalustan kalibrointi.....</b>	<b>41</b>
<b>Liite 2 Ulkomitat .....</b>	<b>42</b>
<b>Liite 3 Sisämitat .....</b>	<b>43</b>

## Käytetyt lyhenteet

<b>3D</b>	<b>Three dimensional</b>
<b>3MF</b>	<b>3D printing file format</b>
<b>ABS</b>	<b>Acrylonitrile butadiene styrene</b>
<b>AM</b>	<b>Additive manufacturing</b>
<b>AMF</b>	<b>Additive manufacturing file</b>
<b>CAD</b>	<b>Computer-aided Design</b>
<b>FDM</b>	<b>Fused deposition modeling</b>
<b>FFF</b>	<b>Fused filament fabrication</b>
<b>OBJ</b>	<b>Object file</b>
<b>PLA</b>	<b>Polylactid acid</b>
<b>STL</b>	<b>StereoLithography</b>
<b>STEP</b>	<b>Standard for the Exchange of Product Model Data</b>

## 1 Johdanto

Mittaaminen on tärkeä osa ihmisen elämää. Ostamme polttoainetta ajoneuvoihimme litrahinnalla. Jokaista otettua litraa kohden maksamme sovitun hinnan. Onkin tärkeää tietää mittarin näyttäessä yhtä litraa, että olemme saaneet yhden litran polttoainetta. Tämä vaatii valmistetuilta osilta ennalta määriteltäviä vaatimuksia kuten mekaanista kestävyyttä sekä mittatarkkuutta. Lisäksi mittarin tulee olla hyvin suunniteltu ja kalibroitu käyttöä varten. Näillä samoilla kriteereillä valmistetaan myös laadukkaita kolmiulotteisia tulosteita.

Kuluttajatasen 3D-tulostimien yleistyessä kodeissa oletetaan saavan käyttäjäystävällinen ”napsauta-vain-päälle-ja-odota” – periaatteella toimiva valmis laitteisto, joka tuostaa mittatarkkoja kappaleita. Valitettavasti näin ei useinkaan ole, vaan usein 3D-tulostimiin viitataan harrastajien sekä keksijöiden laitteistona jota joudutaan koko ajan kalibroimaan ja säätämään. Kuitenkin monet yritykset ja koulut ovat hankkineet käyttöönsä halvempia kuluttajatasen tulostimia joiden tulostuslaatu on riittävän tarkka käyttötarkoitustaan varten. Parhaimmillaan laitteilla päästäänkin ammattitasaan vastaavaan laatuun paljon pienemmillä kustannuksilla.

Uusien materiaalien, materiaalivalmistajien, laitevalmistajien sekä lukuisten eri tulostusparametrien takia on vaikea tietää varmuudella tulostusten tarkkuutta eikä vakiintunutta tapaa mittaamiselle ole olemassa. Mittaukset joudutaan usein tekemään itse omalla menetelmällä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda menetelmä jonka avulla voidaan arvioida, tilastoida ja ymmärtää paremmin oman laitteiston mittatarkkuutta. Lisäksi luodun menetelmän avulla haluttiin tutkia yhden tulostimen tarkkuutta x- ja y-akselien suhteen ulko- ja sisämittauksilla eri muodoilla.

## 2 Materiaalia lisäävä valmistus

Materiaalia lisäävä valmistus, eli 3D-tulostus, on prosessi jossa kolmiulotteinen kapale muodostetaan virtuaalisen mallin ohjaamalla laitteella liittämällä materiaalia yhteen kerros kerrokselta. (Lehtinen 2015.) Kerrokset ovat kymmenistä mikrometreistä kymmeneen senttimetreihin paksuisia, ja ovat päätekijöitä tulostuksen laadukkuuteen. (Boschetto, Giordano & Veniali 2013.) Materiaaleina käytetään nykyään esimerkiksi muovia, metallia tai betonia.

### 2.1 Historia

Materiaalia lisäävä valmistus syntyi 1980-luvulla Yhdysvalloissa. Ensimmäisinä saapui markkinoille ultraviolettilampulla nestettä kovettavat sekä laserilla jauhetta sulattavat tulostimet. (Paukku 201, 24–25; Lipson & Kurman 2013, 12.) Myöhemmin uusia menetelmiä on kehitetty ja paranneltu olemassa olevia. Nykyään olemassa olevat menetelmät voidaan jakaa seitsemään alaryhmään.

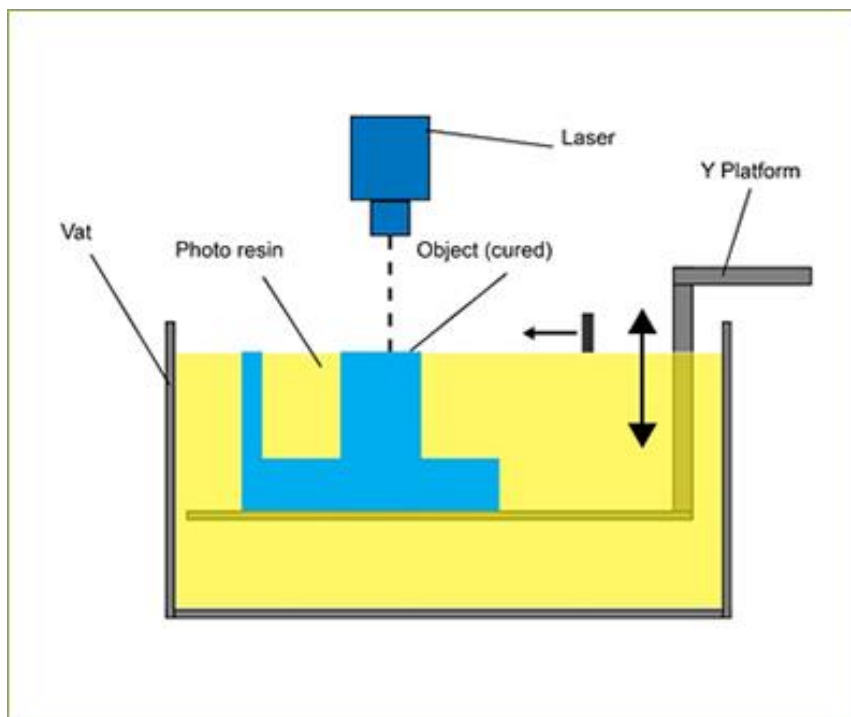
- Allasvalopolymerisaatio
- Materiaalin ruiskutus
- Sideaineen ruiskutus
- Materiaalin pursotus
- Laminointi
- Jauhepetitekniikka
- Materiaalin ja lämmön kohdistus

(Lehtinen 2015.)

## 2.2 Menetelmät

### Allasvalopolymerisaatio

Nestemäistä polymeeriä sisältävän altaan rakennuspinnalle kohdistetaan näkyvää valoa tai UV-valoa joka kovettaa pyyhkäisemänsä kohdan. Rakennuspintaa lasketaan halutun kerrosvahvuuden verran ja uutta nestettä pääsee rakenteen päälle. (Lehtinen 2015.) Kuvassa 1 on esitetty allasvalopolymerisaation toimintaperiaate.

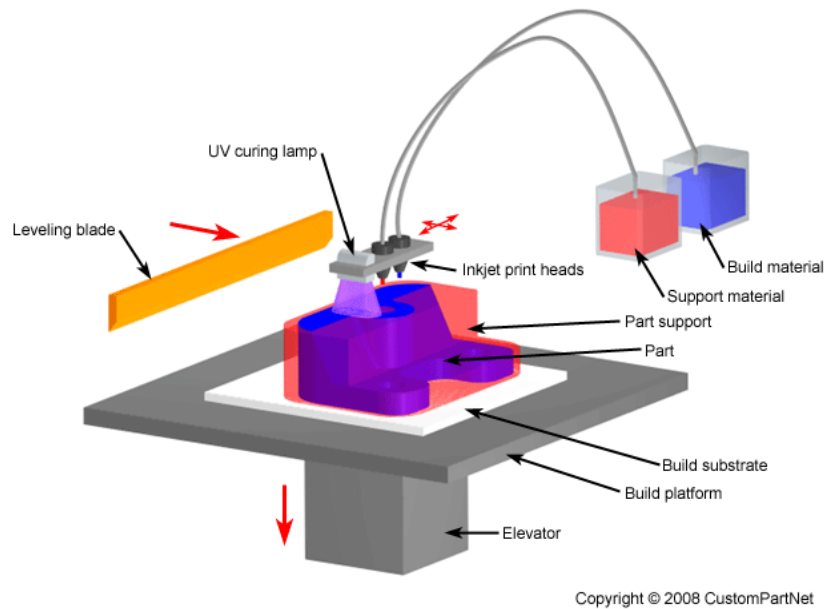


Kuva 1. Allasvalopolymerisaation toimintaperiaate (Loughborough University 2015)

### Materiaalin ruiskutus

Rakennuspinnalle ruiskutetaan materiaalipisaroita haluttuihin kohtiin, jotka kovettuvat paikalleen. Menetelmälle on ominaista että pisaroita ruiskutetaan usealla tulostuspäällä. Materiaalina käytetään valokovettuvaa polymeeriä tai vahaa. (Lehtinen 2015.) Kuvassa 2 on esitetty materiaalin ruiskutuksen toimintaperiaate.

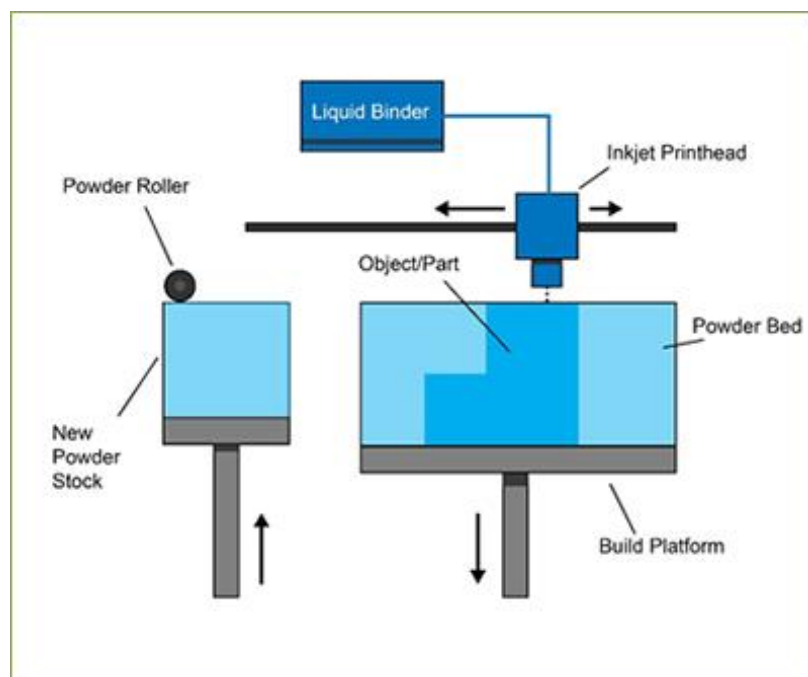




Kuva 2. Materiaalin ruiskutuksen toimintaperiaate (CustomPartNet 2015)

### Sideaineen ruiskutus

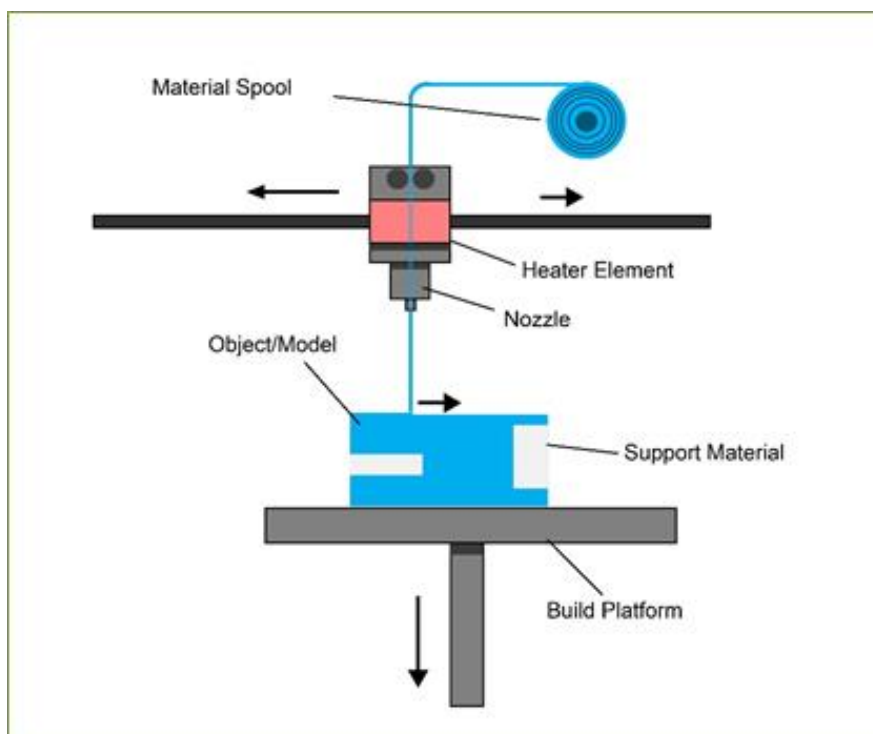
Rakennuspinnan päällä olevaan jauhemaiseen aineeseen ruiskutetaan reagoivaa nestemäistä sideainetta. Sideaine reagoi huoneenlämmössä ja kovettaa jauhemaisen aineen. (Lehtinen 2015.) Kuvassa 3 on esitetty sideaineen ruiskutuksen toimintaperiaate.



Kuva 3. Sideaineen ruiskutuksen toimintaperiaate (Loughborough University 2015)

## Materiaalin pursotus

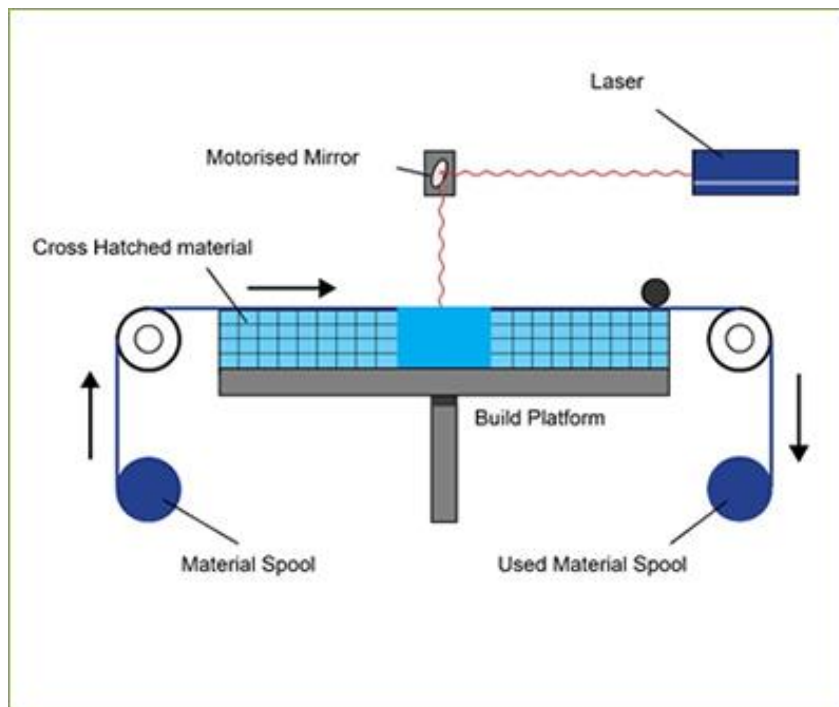
Rakennuspinnalle pursotetaan suuttimen läpi sulatettua materiaalia. Materiaalina käytetään kestopuovinauhaa tai putkistoa pitkin annosteltavaa massaa. Toisella suuttimella voidaan tulostaa liukenevaa tukimateriaalia joka mahdollistaa monipuolisemmat tulosteet. (Lehtinen 2015.) Kuvassa 4 on esitetty materiaalin pursotuksen toimintaperiaate.



Kuva 4. Materiaalin pursotuksen toimintaperiaate (Loughborough University 2015)

## Laminointi

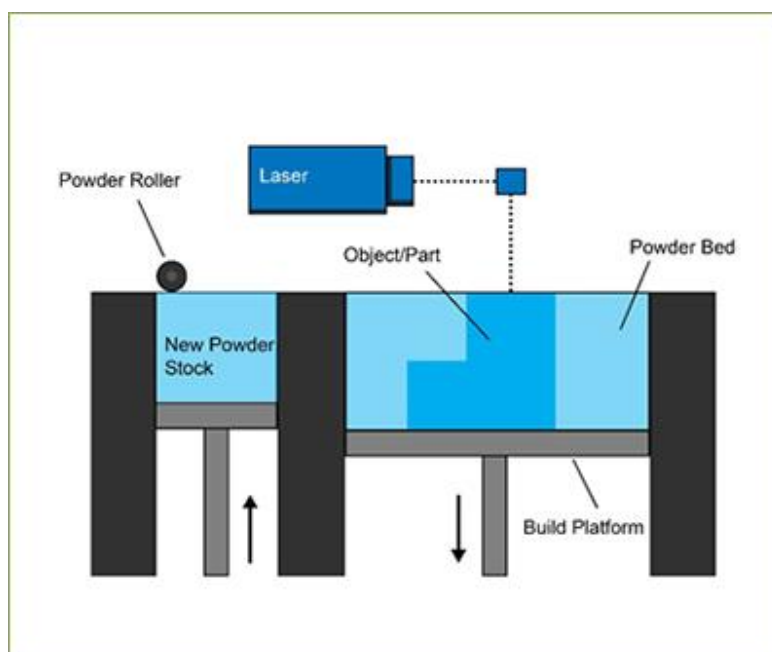
Ohuesta levymäisestä sidonta-aineella pinnoitetusta materiaalista leikataan ja laminoidaan kerroksia kuumien rullien avulla. Materiaalina käytetään yleensä paperia tai metallia. (Lehtinen 2015.) Kuvassa 5 on esitetty laminoinnin toimintaperiaate.



Kuva 5. Laminoinnin toimintaperiaate (Loughborough University 2015)

### Jauhepetiteknikka

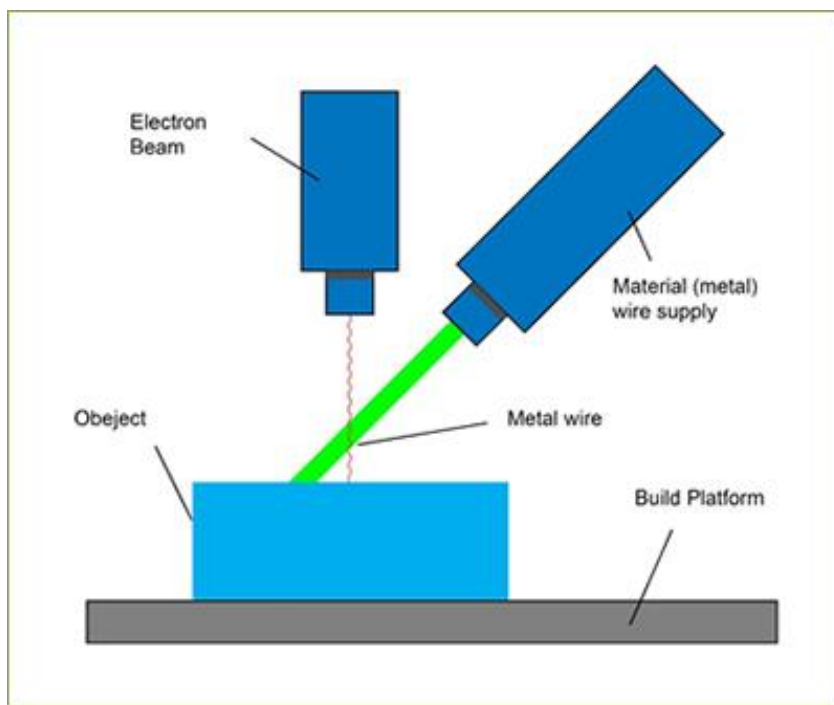
Rakennuspinnan päällä sijaitsevaan jauhemaiseen materiaaliin kohdistetaan lämpöä, usein laserin avulla, jolloin materiaali sulaa kiinni edelliseen kerrokseen. Pinnalle levitetään uusi kerros jauhetta ja prosessi toistuu. (Lehtinen 2015) Kuvassa 6 on esitetty jauhepetiteknikan toimintaperiaate.



Kuva 6. Jauhepetiteknikan toimintaperiaate (Loughborough University 2015)

## Materiaalin ja lämmön kohdistus

Rakennuspinnalle kohdistetaan samaan aikaan lämpö sekä jauhemainen materiaali suuttimien kautta. Materiaalina käytetään usein metallijauhetta. (Lehtinen 2015.) Kuvassa 7 on esitetty materiaalin ja lämmön kohdistuksen toimintaperiaate.



Kuva 7. Materiaalin ja lämmön kohdistuksen toimintaperiaate (Loughborough University 2015)

## 2.3 Hyödyt & haasteet

Materiaalia lisäävän valmistuksen suurimpia hyötyjä ovat tulostettavien kappaleiden monipuolisuus, kokonaisajan sekä -kustannusten säästö. Kappaleiden monipuolisuus mahdollistaa aiempaa paremman optimoinnin painon tai keveyden suhteen, yksilöllisemmän geometrian luonnin tai useamman eri variaation luomisen kappaleesta kerralla. Kokonaisajan säästöllä pystytään käyttämään aikaa tärkeämpiin tehtäviin sekä tekemään asiat nopeammin valmiiksi. Kustannusten säästöllä pystytään luomaan kappaleita halvemmalla sekä pienentämään investointien tarvetta. (Lipson & Kurman 2013, 20–24.)

Haasteina tekniikalle ovat kappalekustannukset eräkoon kasvaessa, mittatarkkuuden puute, materiaalien vähyys, tulosteiden vaatima jälkikäsittely sekä immateriaalioikeudet. (Pauku 2013.).

## 2.4 Käyttökohteet

Materiaalia lisäävää valmistusta on käytetty yleisesti prototyyppien valmistukseen, visuaaliseksi avuksi tai esitelmämalleiksi mutta nykyään menetelmällä halutaan jo usein valmistaa lopullisia kappaleita. (Turner & Gold 2015.) Materiaalien ja menetelmien kehittyessä yhä monimutkaisempia kappaleita ja kokonaisuuksia pystytään valmistamaan.

### Metalliteollisuus

Suurimmat tämän hetken lupaukset ovat metallissa, mitkä ovat mahdollistaneet suurempi sopivien materiaalien valikoima sekä prosessien kehittyminen. Kuitulaserin kaupallistuminen on mahdollistanut lähes minkä tahansa metalli- sekä keraamimateriaalin käytön. (Jaakkola 2014.)



Kuva 8 Metallitulosteita (inside3dprinting 2014)

Metallia tulostamalla voidaan valmistaa monimutkaisempia kappaleita joita ei perinteisillä menetelmillä voida valmistaa. Esimerkiksi jauhepetitekniiikan avulla pystytään tulostamaan pieniä poria, koska tekniikka mahdollistaa jäähdytysnesteen määrän kaksinkertaistamisen. Tämä ei ole mahdollista perinteisellä tekniikalla. (Maypal tekee pieniä porarunkoja 3d-tulostuksella. 2014.)

Valumuottien sekä -mallien tulostus korvaa perinteisiä valmistustapoja. Parhaimmillaan muotti voidaan valmistaa kolmessa päivässä mikä on valmistustekniikan suurimpia etuja. (Lehtinen 2014.)

## Rakennusteollisuus

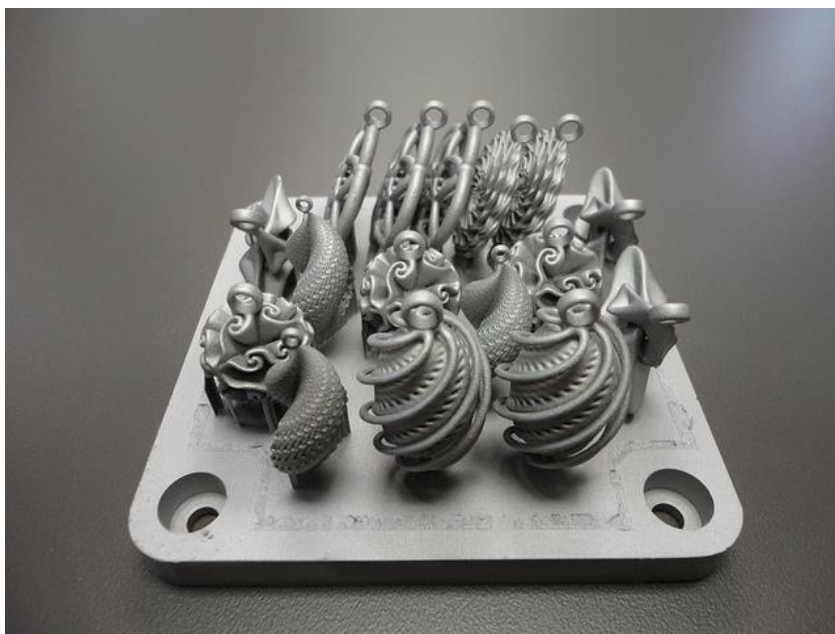
Rakennuksia pystytään jo tulostamaan materiaalia pursottavalla tekniikalla. Laite tulostaa osia joista rakennus myöhemmin kasataan. Menetelmän avulla voidaan vähentää rakennusjätteen määrää 30–60 % sekä tuotantoaika 50 -70 %. (Starr 2015.) Materiaalia lisäävällä valmistuksella myös pystytään valmistamaan eristävämpiä rakenteita jättämällä pieniä ilmataskuja rakenteisiin. (Hausman 2014, 49-52.)



Kuva 9. Betonista tulostettuja kappaleita (3ders.org 2012)

## Koruteollisuus

Koruteollisuudelle materiaalia lisäävä valmistus on tuonut suuria muutoksia. Koruja pystytään viemään tuotantoasteelle jopa 70 % halvemmalla kuin aikaisemmin. Korut voivat olla yhä monimutkaisempia geometrioiltaan ja aikaa saadaan säästettyä. Toiseksi koruja harvemmin valmistetaan suoraan tulostamalla, vaan ensin tulostetaan vahamalli jonka avulla korut myöhemmin valetaan. (Heikkilä 2012.)



Kuva 10. Koruteollisuuden tulosteita (Math Jewelry designs 2011)

## Lääketiede

Proteeseja ja niiden osia on myös aloitettu valmistamaan materiaalia lisäävällä valmistuksella. Tekniikalla on valmistettu huokoisia proteeseja joihin luu voi kasvaa kiinni sekä kasvoimplantteja jotka ovat aiempaa enemmän ihmisen muotoja muistuttavia. Hammasteknikoille materiaalia lisäävällä valmistuksella saadaan helpotusta esimerkiksi hampaiden vahamalleja tehdessä. Näitä vahamalleja käytetään valaessa korvaavia hampaita. (Kauppinen 2014.) Biotulostuksen avulla voidaan valmistaa esimerkiksi kehon elimiä tai mittatilauslääkkeitä. Tutkijat ovat tulostaneet kantasoluja sisältäviä nesteitä onnistuneesti ja keinotekoisen sydänläpän. (Lipson & Kurman 2013, 116–118.)



Kuva 11. 3D-tulostettu proteesi (Bespoke Innovations 2012)

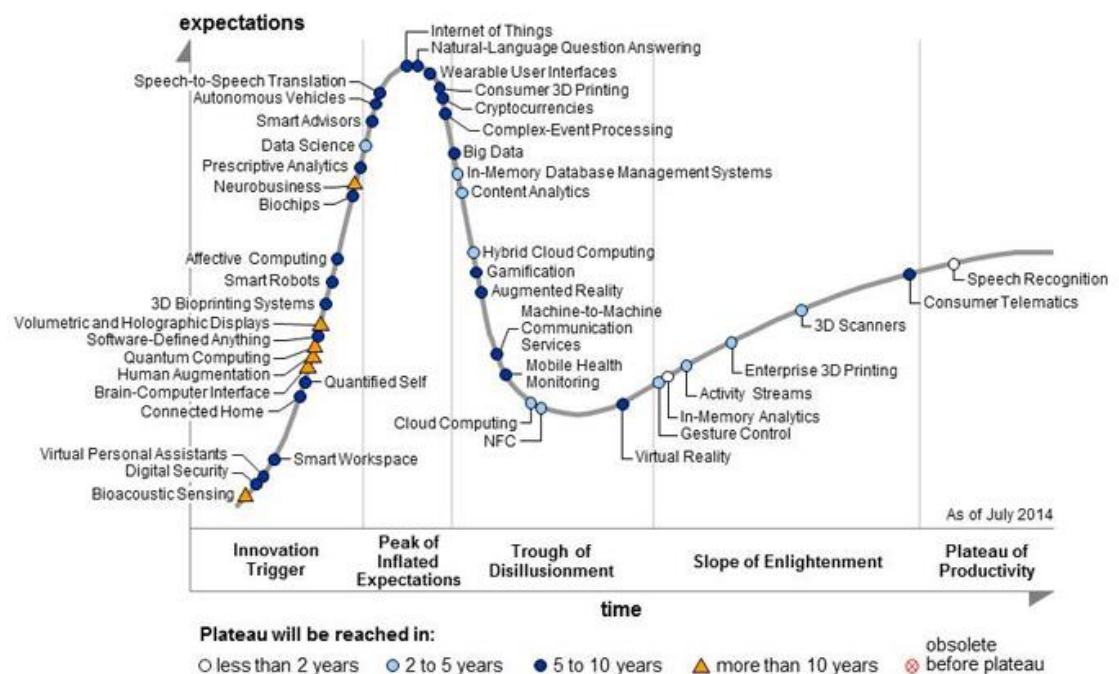
## 2.5 Tulevaisuus

Materiaalia lisäävän valmistuksen kasvu ei osoita taantumuksen merkkejä. Wohlers Associates:n vuoden 2014 raportin mukaan ala tulee kasvamaan vuoden 2013 3,07 miljardista dollarista vuoteen 2018 mennessä 12,8 miljardiin dollariin. Vahva kasvu tulee selittymään alle 5000 dollarin kotilaitteiston myynneillä sekä lisääntyvästä metallien käyttämisestä tuotannoissa. (3D PRINTING, ADDITIVE MANUFACTURING INDUSTRY EXPECTED TO QUADRUPE IN SIZE IN FOUR YEARS. 2104.)

Gartner Hype Cycle tarjoaa tietoa teknologioiden kypsyydestä sekä arvioi niiden tulevaisuutta. Raportti julkaistaan aina vuosittain ja se sisältää yli 2000 eri teknologiaa



119 eri alueelta. Materiaalia lisäävä valmistus on vuoden 2014 raportissa jaettuna kolmeen osa-alueeseen teolliseen 3D-tulostukseen, kuluttaja 3D-tulostukseen sekä 3D-biotulostukseen. Hype Cycle:n mukaan teollinen 3D-tulostus on tällä hetkellä kypsimmillään biotulostuksen vasta ollessa lähtökuopissaan. 3D-kuluttajatulostamisen odotukset ovat suurimmillaan tällä hetkellä ja ne tulevat 5-10 vuoden sisään laantumaan. (Stamford 2014.) Kuvio 12 esittää tarkemmin tietoja.

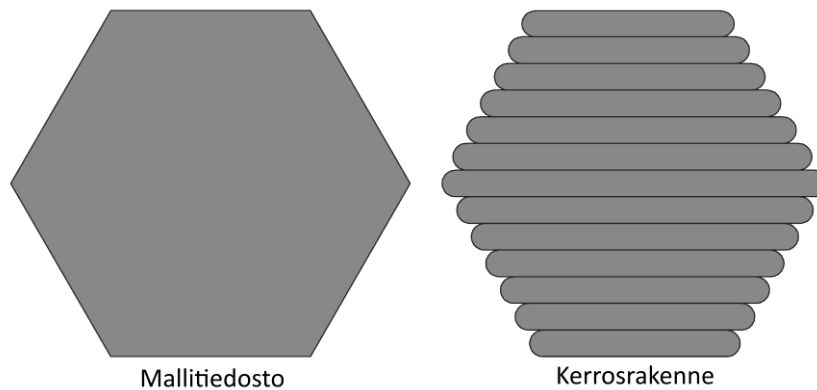


Kuva 12. Gartner Inc. Hype Cycle 2014 (Gartner Inc 2014)

### 3 Mallista tulosteeksi

Materiaalia lisäävän valmistuksen valmistusprosessi on yksinkertainen. Laitetta ohjaa mallitiedoston avulla muodostettu ohjetiedosto. Ohjetiedoston avulla laite kovettaa puuterimaisen, sulatetun tai nestemäisen kerroksen materiaalia tasomaiseksi kuvaksi, siirtyy alkuasentoon ja kovettaa uuden kerroksen. Tätä jatkuu kunnes ohuet kerrokset ovat muodostaneet kolmiulotteisen valmiin kappaleen. (kts. kuva 13) Valmiin kappaleen jälkikäsittely sekä mallitiedoston valmistelu tulostuskuntoiseksi vievät suurimman osan prosessin ajasta. (Lipson & Kurman 2013, 77.)





Kuva 13. Esimerkki kerrosrakenteesta

### 3.1 Suunnittelu

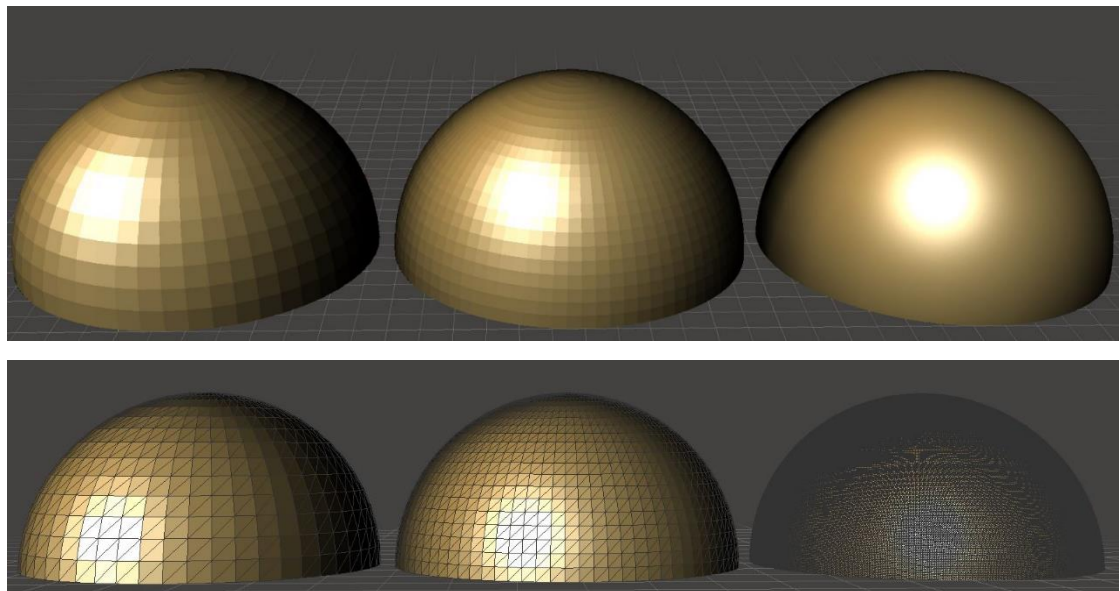
Tuotteen suunnittelun alussa usein määritellään tuotevaatimuslista. Listassa esitetään vaaditut tavoitteet, rajoitukset sekä mahdolliset toiveet joihin pyritään kiinnittämään huomiota kappaletta suunnitellessa. Tärkeitä kysymyksiä vaatimusluetteloa laadittaessa ovat mm. tuotteen suorituskyky, geometria, paino sekä käyttöolosuhteet. (Björk, Hautala, Huhtala, Kivioja, Kleimola, Lavi, Martikka, Miettinen, Ranta, Rinkinen & Salonen 2014, 11-12.)

Samalla tavalla materiaalia lisäävässä valmistuksessa suunnittelu takaa parhaan lopputuloksen. Vaatimuslistan avulla valitaan sopivin menetelmä sekä muokataan mallia jo suunnitteluvaiheessa sopivaksi. Vaikka materiaalia lisäävää valmistusta mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden luonnin, on tälläkin tekniikalla omat heikkoutensa. Esimerkiksi kaikilla materiaalia lisäävillä valmistustavoilla on olemassa pienin seinämäpaksuus jotta tulostettavat kappaleet tulostuvat ehjinä. Kaikki seinämät jotka eivät ole tarpeeksi paksuja, tulisi muuttaa paksummaksi. (Shapeways 2015.)

Malli suunnitellaan usein CAD-mallinnusohjelmalla koska ohjelma määrittelee kappaleen yksinkertaisella ja selkeällä matemaattisella tavalla. Kappaleen ulko- ja sisäpuolen määrittelyssä ei saa tulla virheitä ja CAD-malli toimii näissä tilanteissa varmasti. (Groover 2011, 777-778.)

### 3.2 STL käännös

Luotu CAD-malli käännetään tiedostomuotoon joka muodostaa kappaleen pinnan kolmioiden tai polygonien avulla. Ennen mallin käännettä on tärkeää varmistua mallin vesitiivyydestä sekä sopivasta kolmioiden määrästä eli tiheydestä. Vesitiivyyden puuttuessa koko malli voi tulostua virheellisenä esimerkiksi ilman yhtä osaa seinästä. Monet ohjelmistot osaavat kuitenkin tarkistaa ja jopa automaattisesti korjata pienet virheet. Mallin tulee olla tarpeeksi tiheä (kts. kuva 14.), jotta pinnanlaatu ei kärsi, mutta myös tarpeeksi harva että se ei vaadi liikaa laskentatehoa tietokoneelta tulevilla vaiheilla. Suuria ja monimutkaisia malleja tulostaessa vaadittava aika kasvaa huomattavasti. (Lipson & Kurman 2013, 78-80.)



Kuva 14. STL mallin eri tiheyksiä

Yleisin käytössä oleva tiedostomuoto on STL (Groover 2011, 777-778.). STL-tiedosto sisältää kappaleen muotoa ja kokoa mallintavien pintakolmioiden tiedot sekä kolmioiden normaalit (Lehtinen 2015). Muita käytössä olevia tiedostomuotoja ovat OBJ, 3MF sekä AMF, mutta ne eivät ole vielä yhtä suosittuja kuin STL.

STL tiedosto on tällä hetkellä alan standardi tiedostomuoto, mutta sen suurimpia ongelmia ovat värin sekä tekstuureiden tallennuksen puuttuminen (Kira 2015). Puutteiden johdosta ovat syntyneet 3MF ja AMF tiedostomuodot joita käytetään yhä enemmän. (Callahan 2015.)

### 3.3 Viipalointi

Laitevalmistajien eri laitemallit koostuvat erilaisista mekaniikoista sekä ohjelmistoista. Tämän takia jokaiselle laitemallille täytyy olla erilainen tiedosto joka kertoo kuinka kappale rakennetaan.

Koska materiaalia lisäävä valmistus tapahtuu kerroksittain, STL malli pilkotaan halutun paksuisiksi viipaleiksi tulostimen ohjelmistolla. Viipaleiden avulla muodostetaan fyysinen polku, jonka avulla kappale valmistetaan. (Groover 2011.) Fyysisen polun määrittelyssä ohjelmisto määrittelee kappaleiden ulkopinnat sekä sisäpinnat ja täyttää väliin jäävän tilan halutulla kuviolla ja tiheydellä.

### 3.4 Jälkikäsittely

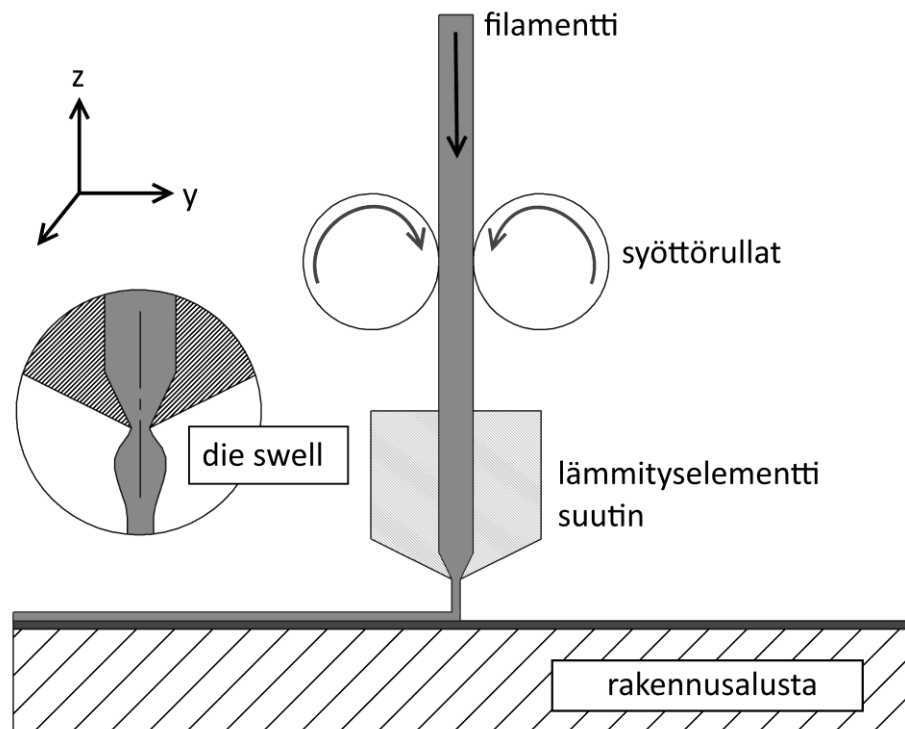
Valmis tuloste tarvitsee usein jälkikäsittelyä jossa poistetaan ylimääräisiä tukirakenteita tai materiaalia kovetetaan siihen sopivalla prosessilla. Lisäksi tuloste saatetaan maalauttaa tai sen pintoja voidaan koneistaa jos halutaan tarkkoja mittoja. (Lipson & Kurman 2013, 81.) Suurin osa jälkikäsittelystä on käsityötä mikä lisää tulosteiden kustannuksia huomattavasti.

## 4 Kuluttajatasen tulostimet

Kuluttajatasen 3D-tulostimia on ollut markkinoilla vasta muutaman vuoden. Useiden patenttien vanhentuminen on saanut aikaan kymmenien uusien valmistajien tulon markkinoille. Laitteet kehittyvätkin tällä hetkellä huimaa vauhtia ja uusia materiaaleja tuodaan markkinoille jatkuvasti. (Horvath 2014.)

Alun perin Stratasyksen kehittämä FDM-menetelmä on yleisin kuluttajatasen tulostimissa. Kuluttajatasolla usein puhutaankin FFF-menetelmästä eli materiaalia pursottavasta menetelmästä. (Turner & Gold 2015, 2.)

Materiaalia pursottavan tulostimen rakenteen muodostavat runko, tulostuspää, tulostusalusta sekä ohjauselektroniikka. Tulostuspää ja -alusta liikkuvat tai pyörivät x-, y- tai z-akselin suuntaisesti mallista riippuen. Tulostuspää tulostaa sulatettua termoplastista muovia pienen lämmitetyn suuttimen läpi. (Hausman 2014, 33.)



Kuva 15. FFF-menetelmän toimintaperiaate

Käytetyt termoplastiset materiaalit, puhekielessä filamentti, ovat yleensä lankana ke-  
lalla ja ovat halkaisijaltaan 1,75 ja 3,00 mm väliltä. Käytetyimpiä materiaaleja ovat  
ABS, PLA, nylon sekä komposiittimateriaalit. Uusimmat materiaalit voivat muistuttaa  
puuta, metallia tai keramiikka ulkonäöltään sekä voivat olla sähköä johtavia tai hyvin  
venyviä. (Hausman 2014, 34.)

**ABS** (Acrylonitrile butadiene styrene)

ABS on yleinen kuluttajatuotteissa käytetty muovi. Sitä on helppo työstää, mikä tekee siitä erinomaisen jälkikäsittelyä varten. ABS:llä on hyvä jäykkyys, lujuus sekä sitkeys. (Budinski & Budinski 2002, 199.)

**PLA** (Polylactide)

PLA on biohajoava synteettinen muovi. PLA:n matalasulamislämpötila tekee materiaalista helposti tulostettavan. PLA:lla on hyvä sitkeys sekä jäykkyys. (Garlotta 2001, 1.)

## 5 Mittatarkkuus

Mittatarkkuutta arvioidessa tarkastellaan CAD-mallin mittojen eroavaisuuksia valmiin kappaleen mittoihin ja se usein määritellään suunnittelutoleranssien avulla. (Turner & Gold 2015, 8.)

### 5.1 Tulostimen mittatarkkuus

Materiaalia pursottavalla menetelmällä valmistettujen kappaleiden mittatarkkuus sekä resoluutio muodostuvat prosessin ja tuotesuunnittelun parametreista sekä tulostettavan materiaalin ominaisuuksista. (Turner & Gold 2015, 6.)

**Prosessin parametrit**

Resoluution muodostavat tulostusalustaa ja -päättä ohjaavien moottorien tarkkuus, ohjausalgoritmit sekä tulostuspään suuttimen halkaisija. Moottorien tarkkuus määrittelee pienimmän mahdollisen käyrän joka voidaan CAD-mallista kääntää tulostettavaksi muodoksi. Materiaalia pursottavalla menetelmällä pienin mahdollinen saavutettavissa oleva piirre on 100 µm luokkaa. (Turner & Gold 2015, 8.)

Suuttimen halkaisija määrittää kapeimman mahdollisen tulostusjäljen leveyden. Kapeimmillaan se voi olla 1,2 – 1,5 kertaisesti suuttimen halkaisija. Ilmiö tunnetaan nimellä die swell. Ilmiö johtuu materiaalin tullessa suuttimesta ulos paineella, materiaalin sisään syntynyt energia pääsee poistumaan joka aiheuttaa laajenemisen. (Mts. 8.)

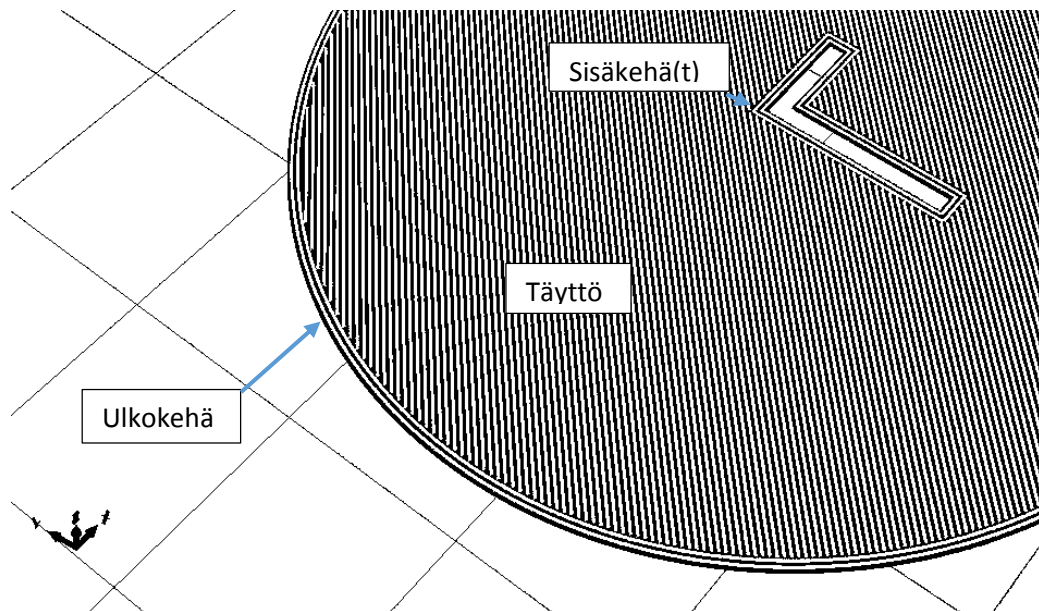
Tulostuskerros muodostuu tulostusjäljen leveyden, korkeuden sekä materiaalin syöttönopeuden mukaan. Tulostus ei tapahdu koskaan jatkuvasti vaan sitä pysäytetään välillä ja tulostuspäätä siirretään uuteen aloituskohtaan. Näissä aloitus ja lopetus kohdissa sekä terävissä kulmissa pienikin virhe materiaalin syötössä muuttaa tulostuksen tarkkuutta. Materiaalin syötön virheet johtuvat usein laskennasta tai syöttörullien ja materiaalin luistosta. (Mt. 11.)

### **Tuotesuunnittelun parametrit**

Tulostettavan tiedoston tarkkuuden tulee olla yhtä hyvä kuin tulostimen resoluution. Huonommalla tarkkuudella mittojen pyöristykset aiheuttavat tulostettavaan kappaleen mittojen muutoksia. (Turner & Gold 2015, 12.)

Tulostimen työstöradan toimivuus on yksi tärkeimmistä toiminnoista. Tulostin usein tulostaa ensin yhtenäisen ulkoisen kehän aikaisemmin määritellyn määrän verran. Ulkokehän jälkeen tulostin tulostaa sisäiset kehät jotka muodostavat reikiä kerrokseen. Tämän jälkeen tulostetaan sisäinen rakenne joka voi olla muodoltaan 45 asteen kulmassa oleva viivasto. (kts. kuva 16.) Täytön tärkein vaihe on sopiva määrä tulostettavaa materiaalia. Liian suuri määrä luo paljon painetta tulostuspäälle minkä takia se saattaa tukkiutua tai materiaali saattaa pursottua liian leveälle. Liian pieni määrä taas muodostaa liian harvan kuvion jättäen ulkonäöllisesti huonon laadun. Pieni määrä voi myös jättää kerroksen liian ohueksi jolloin materiaali ei sula kappaleen pintaan vaan jää ilmaan. (Mts. 5-6.)

Työstöradan parametreista pystytään yleensä vaikuttamaan mm. tulostusleveyteen (line width), kerrospaksuuteen, täytön ominaisuksiin sekä ilmaväliin. Täytön osalta päästään vaikuttamaan materiaalin määrään, kuvioon sekä rakennusjärjestykseen. (Mts. 6.)



Kuva 16. Esimerkki työstöradoista.

### **Materiaali ominaisuudet**

Materiaalin tulee olla tasalaatuista koostumukseltaan ja halkaisijaltaan. Pienet muutokset halkaisijassa muuttavat pursotettavan materiaalin määrää. Tasalaatuisella koostumuksella varmistetaan materiaalin samanlainen käyttäytyminen eri tulostusvaiheissa.

Kappaleen sulaessa ja jäähtyessä tapahtuu lämpölaajentumista ja – supistumista. Tulostusympäristön lämpötilaa säätelemällä voidaan pienentää lämpötilaeroja ja näin myös kappaleen muutoksia. (Turner & Gold 2015, 7.)

## **6 Pituuden mittausmenetelmät**

Pituuden perusyksikkö on metri joka määritellään valon kulkemana matkana  $1/299\,792\,458$  sekunnissa. Pituutta voidaan mitata mekaanisin tai optisin menetelmiin. Mekaanisia mittauslaitteita ovat mm. mikrometrit, työntömitat mittakellot. Optiset mittauslaitteet perustuvat yleisesti infrapunasäteen hyödyntämiseen. (Keinänen & Järvinen 2014, 11–17.)

## 6.1 Työntömitta

Työntömitta on yksi yleisimmistä mittaussvälineistä 0,05mm tarkkuudella tehtävissä pituusmittauksissa. Sillä voidaan mitata ulko- ja sisäpuolisia mittoja sekä syvyysmittoja. Työntömitta voi olla myös digitaalinen jolloin pystytään mittaamaan 0,01mm tarkkuudella. (Keinänen & Järvinen 2014, 55.)

### Rakenne

Rakenteeltaan työntömitta koostuu runko-osasta, liikkuva leuasta sekä pikasalvasta tai lukitusruuvista. Runko-osan muodostavat mitta-asteikolla varustettu pinooli, kiinteä mittaussleuka sekä kiinteä sisämittauskärki. Liikkuva leukaosan muodostavat rungon johdepintoja pitkin liikkuva luisti, sisämittauskärjen sekä mittaussleuan vastinkappaleet, syvyysmittakieli sekä nonius-asteikko. (Keinänen & Järvinen 2014, 55–57.)

### Työntömitalla mittaaminen

Työntömitalla mittaaminen aloitetaan puhdistamalla mitattava kappale hyvin. Työntömitta otetaan puhtaasta säilytyskotelosta ja liiallinen vällys poistetaan pidätinruuveja kiristämällä. Leuat laitetaan yhteen ja valorakomenetelmällä tarkistetaan mitta-kärkien ja –leukojen kunto sekä yhdensuuntaisuus. Leukojen ollessa yhdessä tarkistetaan mitan nolla-asento tai digitaalinen työntömitta nollataan. (Keinänen & Järvinen 2014, 57–61.)

Ulkopuolisessa mittaamisessa on tärkeää asettaa kappale mahdollisimman lähelle mitta-asteikkoa eli leukojen pohjaa. Luistia lähdetään liu'uttamaan kappaleeseen kiinni samalla kun haetaan mitan oikeaa asentoa. Oikean mittaustuntuman löydyttyä liikkuva leuka lukitaan ja mitta luetaan. Jos mittaa ei pystytäkään mittaustilanteessa lukemaan, poistetaan työntömitta kappaleesta jonka jälkeen mitta luetaan. Poistamalla työntömitan kappaleesta voi kuitenkin muuttaa mittalukemaa. Mittaus suoritetaan vähintään kaksi kertaa jotta voidaan olla varma oikeasta tuloksesta. (Mts. 57–61.)

Sisäpuolisessa mittaamisessa mittausta tapahtuu samalla tavalla kuin ulkopuolisessa mittaamisessa. Mittaavana osana käytetään mittakärkiä. Mittaajan tulee kuitenkin



kiinnittää erityistä huomiota oikean mitta-asennon löytymiselle niin pituus- kuin halkaisijan suunnassa. (Mts. 58.)

Syvyysmittauksessa mittaus suoritetaan mittakielellä. Syvyysmittauksessa on todella tärkeää kiinnittää huomiota mitta-asentoon, koska pienikin kulma aiheuttaa suuria virheitä. (Mts. 57–61.)

## 7 Mittausvirheet

Mittaukset eivät koskaan ole tarkkoja, vaan ne ovat arvioita mitattavasta arvosta. Toistamalla mittaukset voidaan antaa arvio mittausvirheen suuruudelle. Mittausvirheet jaotellaan karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. (Keinänen & Järvinen 2014, 95.)

Karkeat virheet ovat selkeästi havaittavia poikkeamia mittauksista ja joiden aiheuttama syy tiedetään. Usein karkean virheen aiheuttavat väärin luettu mitta-asteikko tai mittauslaitteen toimintahäiriö. (Mts. 95.)

Systemaattiset virheet johtuvat käytetystä mittauslaitteesta tai mittausmenetelmästä. Lämpölaajenemisen aiheuttama mittalaitteen muuttuminen on yksi esimerkki systemaattisesta virheestä. (Mts. 95.)

Satunnaisvirheet ovat mittauksissa syntyviä mittausvirheitä jotka kumoutuvat toistamalla mittaus useaan kertaan. (Mts. 95.)

## 8 Tilastolliset menetelmät

Tieteessä pyritään systemaattisesti keräämään tietoa sekä tekemään johtopäätöksiä tiedon avulla. Johtopäätöksiä voidaan tavallisesti tehdä deduktiivisesti tai induktiivisesti. Deduktiivisessa päättelyssä yleisestä tilanteesta edetään yksittäiseen tapahtu-

maan ja induktiivisessa päättelyssä toisinpäin. Otaksumat ja mallit syntyvät induktiivisen päättelyn pohjalta ja myöhemmin deduktiivisen päättelyn avulla voidaan ennakoita tulevaa. Tätä ennen tulee otaksumat ja mallit testauttaa ja se tehdään usein tilastollisesti. (Holopainen & Pulkkinen 2008, 13-14.)

### **Aritmeettinen keskiarvo**

Aritmeettinen keskiarvo on summa, jonka muodostaa rajallinen määrä arvoja, jaettuna niiden lukumäärällä.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$x_i$  = mittaustulos ( $i = 1, 2, \dots, n$ )

$n$  = mittaustulosten määrä

(Konepajan mittaustekniikka. 1987, 58.)

### **Mittaussarjan yksittäisen tuloksen keskihajonta**

Kuvaa suureen samaa arvoa toistuvasti mitattaessa esiintyvää vaihtelua.

$$s = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$n$  = laskentaa käytettyjen mittausten lukumäärä

$x_i$  = yksittäinen mittaustulos

$\bar{x}$  = mittaustulosten aritmeettinen keskiarvo

(Konepajan mittaustekniikka. 1987, 58.)

### Mittaussarjan tulosten aritmeettisen keskiarvon keskihajonta

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

(Konepajan mittaustekniikka. 1987, 58.)

### Pearsonin korrelaatiokerroin

Korrelaatiokertoimen avulla mitataan muuttujien välistä yhteyden voimakkuutta.

Kerroin voi saada arvokseen +1 ja -1 välisiä lukuarvoja. Mitä lähempänä +1 ja -1 kerroin on, sitä enemmän muuttujilla on yhteyttä. Kertoimen arvolla 0 muuttujat ovat riippumattomia toisistaan. (Holopainen & Pulkkinen 2008, 233.)

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum (x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum (y_i - \bar{y})^2]}}$$

Kaavassa

$x_i$  = muuttajan X i. havaintoarvo

$\bar{x}$  =  $x_i$  -arvojen keskiarvo

$y_i$  = muuttajan Y i. havaintoarvo

$\bar{y}$  =  $y_i$  -arvojen keskiarvo

(Holopainen & Pulkkinen 2008, 233.)

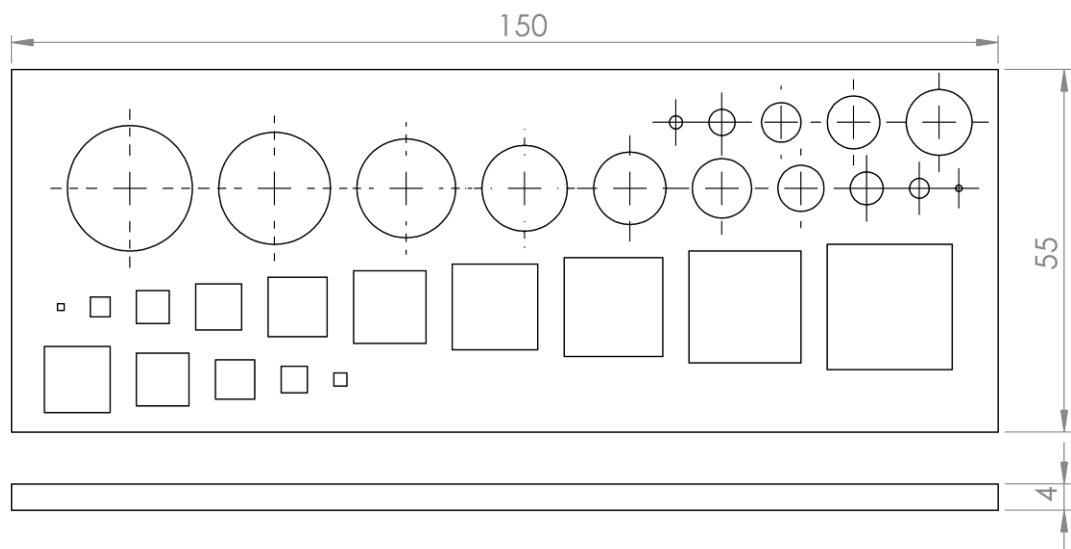
## 9 Tutkimus

Tutkimusosion tarkoituksena oli selvittää yhden kuluttajatason materiaalia pursottavan tulostimen mittatarkkuus PLA:sta tulostetuilla mittakappaleilla. Tutkimuksessa haluttiin keskittyä pieniin muotoihin ja niiden tarkkuuteen. Lisäksi haluttiin verrata sisä- ja ulkomittojen välisiä eroavaisuuksia ympyrä- ja neliöprofiileilla.

Mittauksia varten suunniteltiin viisi kappaletta joiden avulla mittaukset voitiin suorittaa. Suurimmaksi mitattavaksi pituudeksi valittiin 20 mm, koska virheiden oletettiin pienevän kappaleen koon kasvaessa. Jokainen kappale valmistettiin kolme kertaa. Näin pyrittiin vähentämään valmistusvaiheessa syntyviä valmistusvirheitä. Mitattavat kohteet pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman samantyyliisiin kohtiin ja samoille linjoille, jotta materiaalin muutokset olisivat kaikki samanlaisia.

### Kappale 1

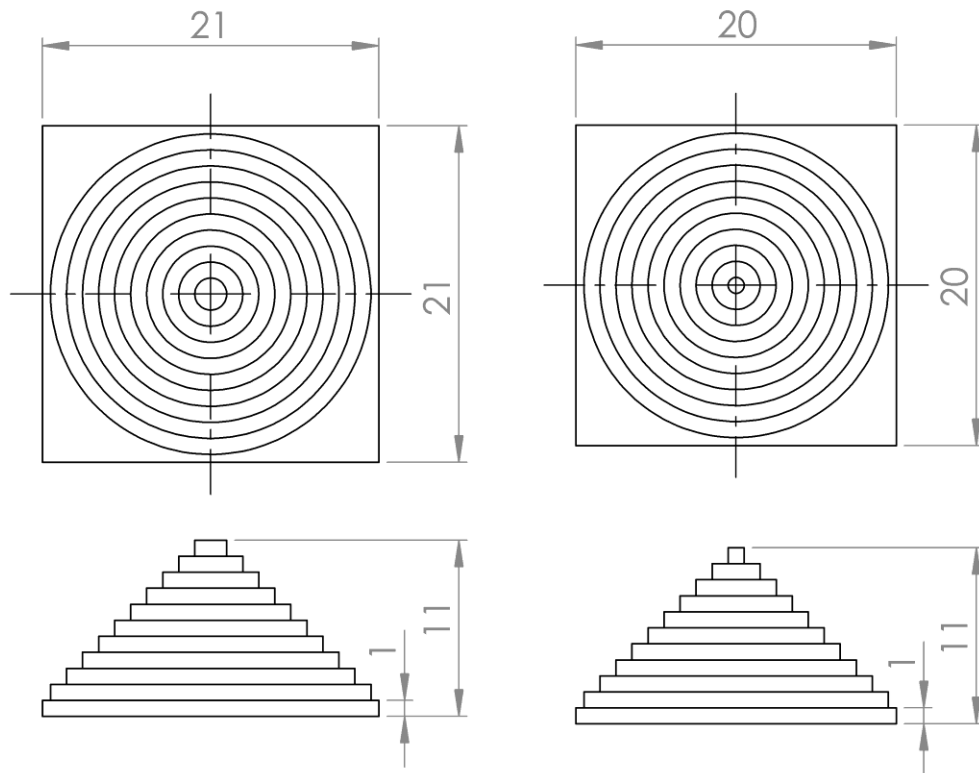
Ensimmäisen kappaleen avulla mitattiin sisämittoja. Kappaleessa on leikkaukset ympyröille sekä neliöille. Leikkaukset ovat tasamillimetrisiä ja kasvavat yhteentoista millimetriin asti millimetrin välein ja tämän jälkeen kahden millimetrin välein, päättyen 19 millimetriin. Kappaleen paksuus haluttiin pitää mahdollisimman pienenä mutta tarpeeksi suurena jotta tarpeeksi suuret ja suorat mittauspinnat saatiin aikaiseksi.



Kuva 17. Ensimmäisen mallikappaleen piirustus

### Kappale 2 & 3

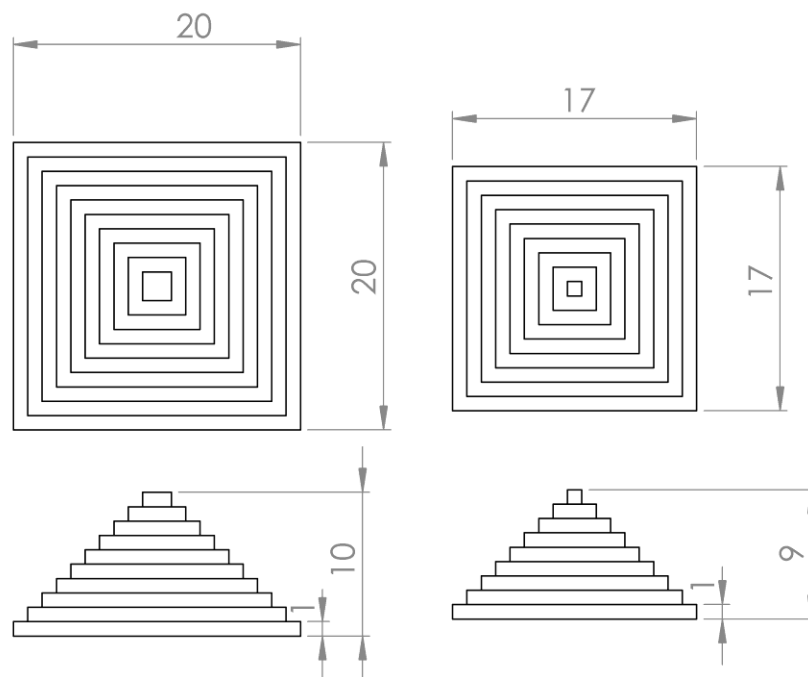
Kappaleiden avulla mitattiin pyöreitä ulkomittoja. Toinen kappaleista koostui parittomista mitoista ja toinen parillisista. Kappale kohoaa aina yhden millimetrin ja kaventuu kaksi millimetriä. Kappaleen pohjaan lisättiin neliöpinta selkeyttämään mittauksia, koska mittausvälineen voi kohdistaa suoran pinnan avulla samansuuntaiseksi.



Kuva 18. Mallikappaleiden 2 ja 3 piirustukset

### Kappale 4 & 5

Kappaleiden avulla mitattiin neliö ulkomittoja. Toinen kappaleista koostui parittomista mitoista ja toinen parillisista. Kappale kohoaa aina yhden millimetrin kerroksessa ja kapenee kaksi millimetriä.



Kuva 19. Mallikappaleiden 4 ja 5 piirustukset

### **3D-tulostin**

3D-tulostimena käytettiin FELIXprinter:in 3.0 versiota. Tulostimen resoluutiot ovat x-akselille 0,013mm, y-akselille 0,013mm ja z-akselille 0,00039mm. Tulostimessa on 0,35mm suutin ja tulostusnopeudet voivat vaihdella 10–200 mm/s välillä. Tarkkalaituisille tulostuksille suositellaan 30-40mm/s nopeutta.

### **Tulostusmateriaali**

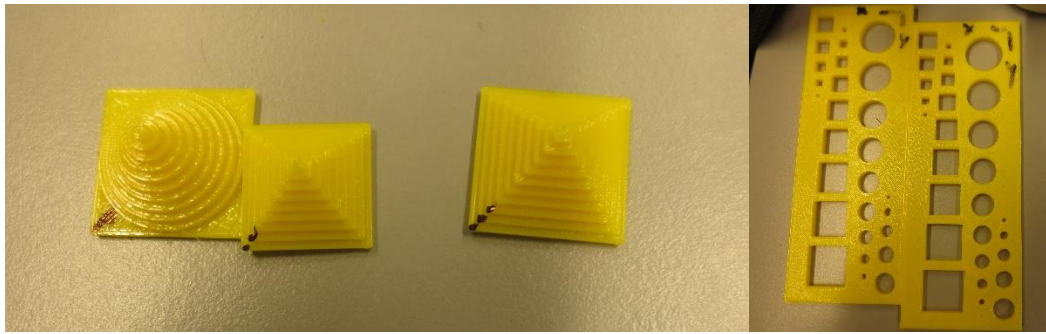
Tulostusmateriaalina käytettiin eSun nimisen valmistajan 1,75mm PLA YELLOW filamenttia. Valmistaja ilmoittaa langan halkaisijan tarkkuudeksi  $\pm 0,05$ mm. Lämpötilaksi suositellaan 190–200 celsiuksen lämpötilaa ja ensimmäisen kerroksen tulostuslämpötilaksi 195 celsiusta. Tätä lämpötilaa käytettiin mittakappaleita tulostaessa.

### **Valmistus**

Kappaleet suunniteltiin Solidworks 2014 ohjelmistolla ja käännettiin STL-tiedostoksi. Käännösasetuksissa käytettiin parasta mahdollista tarkkuutta. Näin eliminoitiin käännösvaiheessa tapahtuvia pyöristysvirheitä.

Viipalointiohjelmistona käytettiin Curaengine:ä ja valmistajan oletusasetuksia. Tulostusparametreina käytettiin tulostimen oletusasetuksia ”very high”-resoluutiolla eli 0,1 millimetrin asetuksilla. Suuttimelle käytettiin materiaalivalmistajan suosittelemaa 195 celsiuksen lämpötilaa ja tulostusalustalle 55 celsiuksen lämpötilaa joka on laitevalmistajan oletuslämpötila PLA muoville. Nopeutena käytettiin 40 mm/s ja täyttöprosenttina 20.

Ennen kappaleen tulostusta tulostusalusta kalibroitiin mittakellolla ja tulostimen kunto tarkistettiin ulkopuolisesti. (kts. liite 1.) Kappaleet tulostettiin peräkkäin täysin samoille kohdille. Tulostimen z-akselin kalibrointi tarkistettiin tulostusten välissä, mutta sitä ei säädetty. Valmiiden kappaleiden annettiin jäähtyä ennen kuin ne poistettiin alustasta ja selkeimmät irtohiukkaset poistettiin. (kts. kuva 20.)



Kuva 20. Mittakappaleet

### Mittausvälineen valinta

Mittausvälineeksi valittiin digitaalinen työntömitta. Sen tarkkuus on riittävä tulostettaviin kappaleisiin nähden. Se on myös yksi yleisimmistä mittausvälineistä.

### Mittaus

Kappaleiden jäähtyttyä suoritettiin mittaukset, jotta ne eivät kerenneet vaurioitumaan. Jokainen mitattava kohta mitattiin kolmeen kertaan x- ja y-akseleiden suunnassa ja tulokset kirjattiin ylös luotuun Excel-taulukkoon.

Mitatessa kiinnitettiin erityistä huomiota mittausvälineen asentoon ja tasaiseen voimaan jolla mittaus suoritettiin.

Mittaukset suoritettiin 16–17.4.2015 ja mittaustulosten analysointi ja johtopäätösten tekeminen aloitettiin mittausten jälkeen.

## 10 Tutkimuksen tulokset

Tulokset esitetään kolmessa osassa. Ensimmäinen osa on jaettu ulko- sekä sisämittoihin. Ensimmäisessä osassa käydään läpi tulokset jotka ovat päteviä kaikilla muilla osilla.

Toisessa osassa tulokset esitetään neliö tai ympyrä profiileiden x- ja y-akseleiden hajontakuvioiden vertailuna. Hajontakuvioiden on lisätty sopiva suuntaviiva selventämään tulosten tarkastelua.

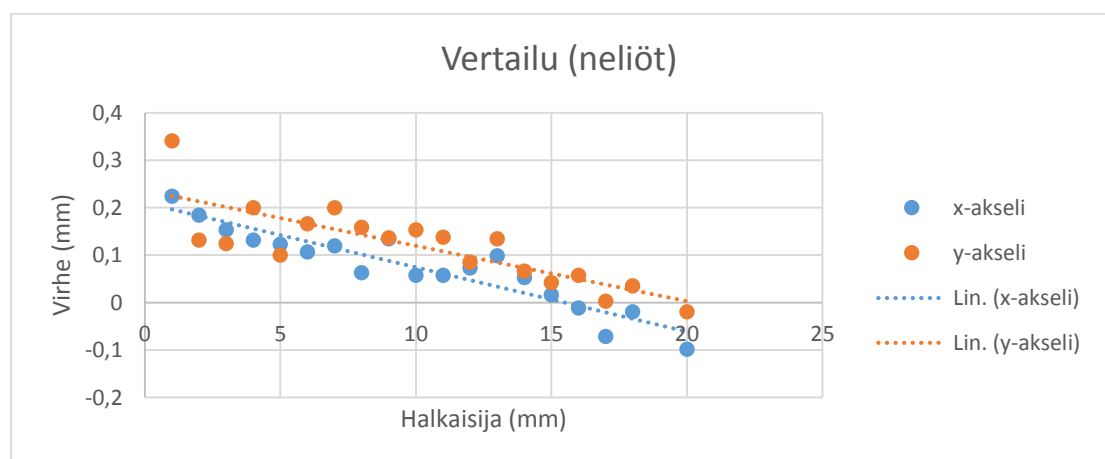
Kolmannessa osassa tulokset esitetään akseleittain. Tulokset on pyritty esittämään mahdollisimman visuaalisesti jotta niitä on helpompi hahmottaa. Kaavioissa esitetään mittausvirheiden keskiarvo, keksihajonta, korrelaatiokerroin sekä suuntaviivan funktio.

## 10.1 Ulkomitat

Ulkomittakappaleiden virheet laskevat tasaisesti kappaleiden halkaisijoiden kasvaessa. Virhe laskee 0,12-0,15 millimetriä jokaista halkaisijan kymmentä millimetriä kohden. Y-akselin virhe on pääsääntöisesti suurempi kuin x-akselin. Virhe on alussa aina positiivinen.

### 10.1.1 Neliö

Neliö kappaleiden hajontakuvioiden avulla muodostetut trendiviivat muistuttavat toisiaan. X-akselin trendiviiva on jatkuvasti noin 0,07mm y-akselin suuntaviivaa matalammalla. Lasku on molemmilla tasaista.

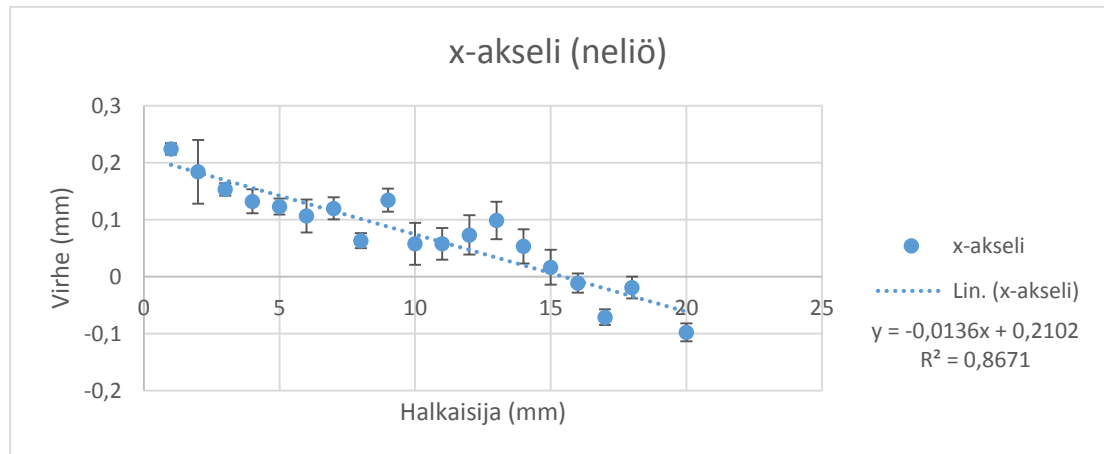


Kuvio 1. Pursotettavien neliö kappaleiden x- ja y-akseleiden vertailu.



### x-akseli

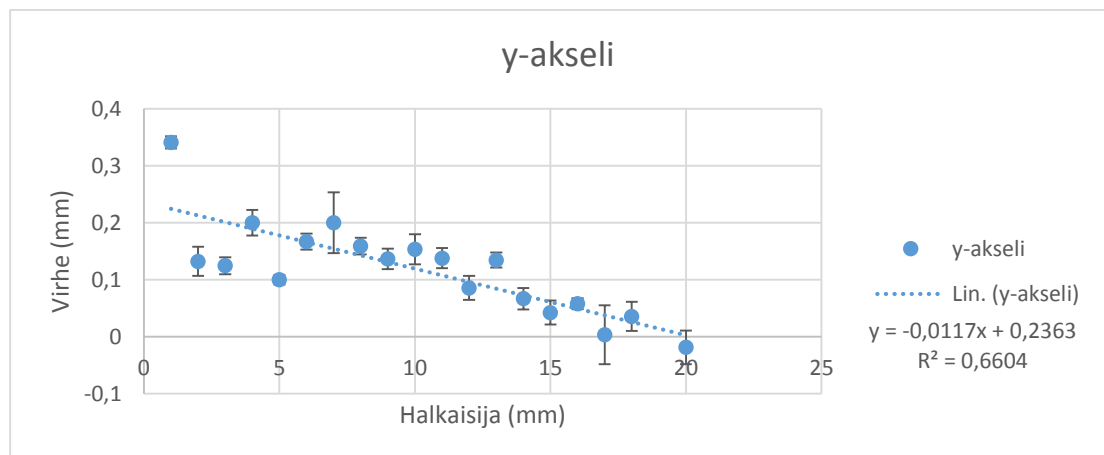
X-akselin hajontakuviio on tasaisessa laskussa. 10-14 millimetrin halkaisijoiden kohdalla virheet tasoittuvat mutta jatkoivat laskua taas 15 millimetrin jälkeen. Keskihajonta on yhtä arvo lukuun ottamatta samanlainen. (kts. liite 1) Korrelaatiokertoimen arvo on 0,87.



Kuvio 2. Pursotettujen neliö kappaleiden x-akselin virheet.

### y-akseli

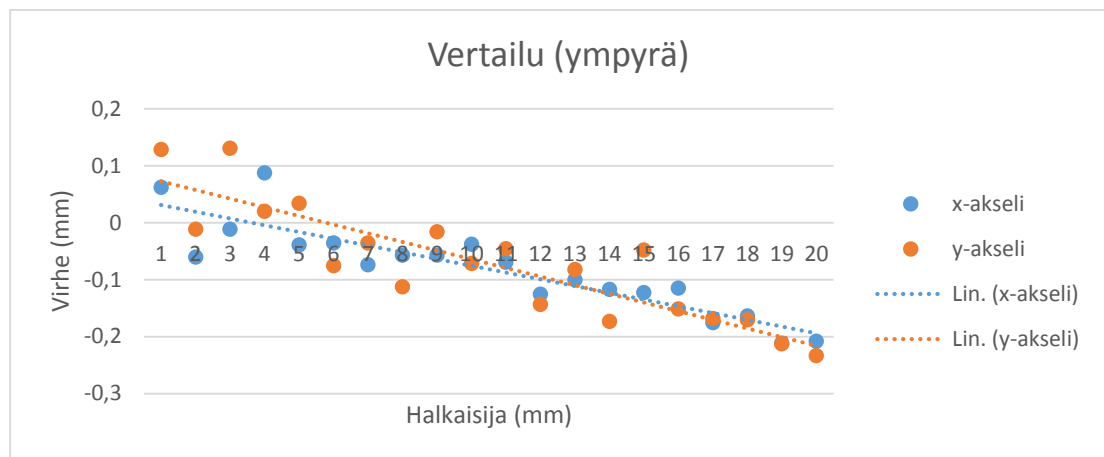
Y-akselin ensimmäisen millimetrin halkaisijan virhe on hajontakuviosta poikkeava. Hajontakuviion arvo pysyvät kokoajan positiivisina mutta laskevat tasaisesti. Keskihajonta on paria kohtaa lukuun ottamatta samanlaista. (kts. liite 1) Korrelaatiokertoimen arvo on 0,66.



Kuvio 3. Pursotettujen neliö kappaleiden y-akselin virheet.

### 10.1.2 Ympyrä

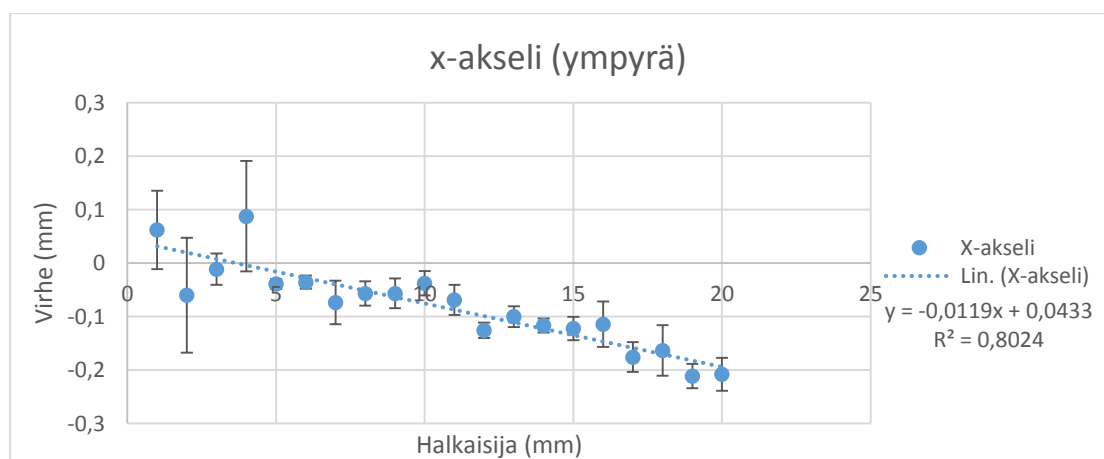
Ympyrä kappaleiden hajontakuvioiden avulla muodostetut suuntaviivat muistuttavat toisiaan. Y-akselin virheen lasku on voimakkaampaa kuin x-akselilla.



Kuvio 4. Pursotettujen ympyrä kappaleiden akseleiden vertailu.

### x-akseli

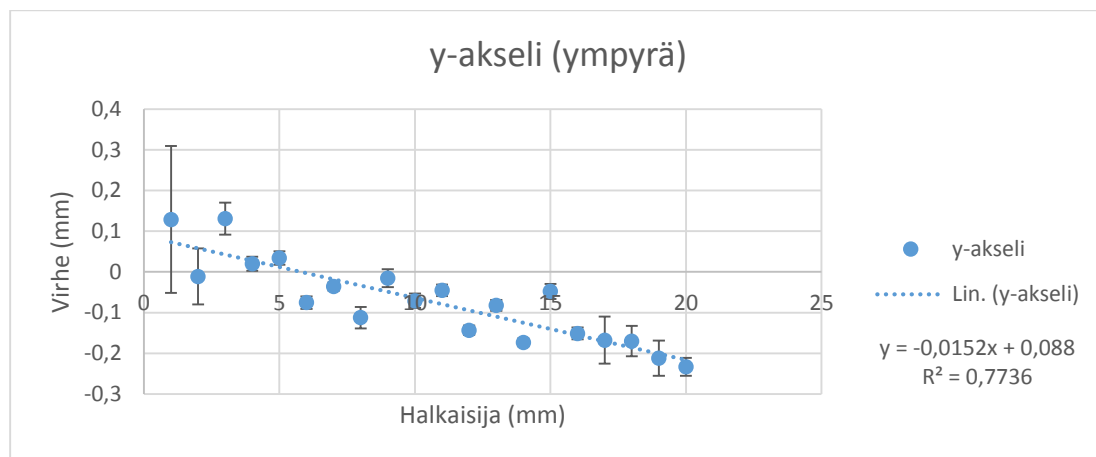
X-akselin hajontakuvio on tasaisessa laskussa. Virheiden arvot ovat lähes koko hajontakuvion negatiivisia. Keskihajonta on neljällä ensimmäisellä halkaisijan arvolla muista suurempaa. (kts. liite 1) Korrelaatiokertoimen arvo on 0,80.



Kuvio 5. Pursotettujen ympyrä kappaleiden x-akselin virheet.

## y-akseli

Y-akselin hajontakuviot on tasaisessa laskussa. Keskihajonta on halkaisijan ensimmäistä arvoa lukuun ottamatta samanlainen. Keskihajonta on monella arvolla todella pientä. (kts. liite 1) Korrelaatiokertoimen arvo on 0,77.



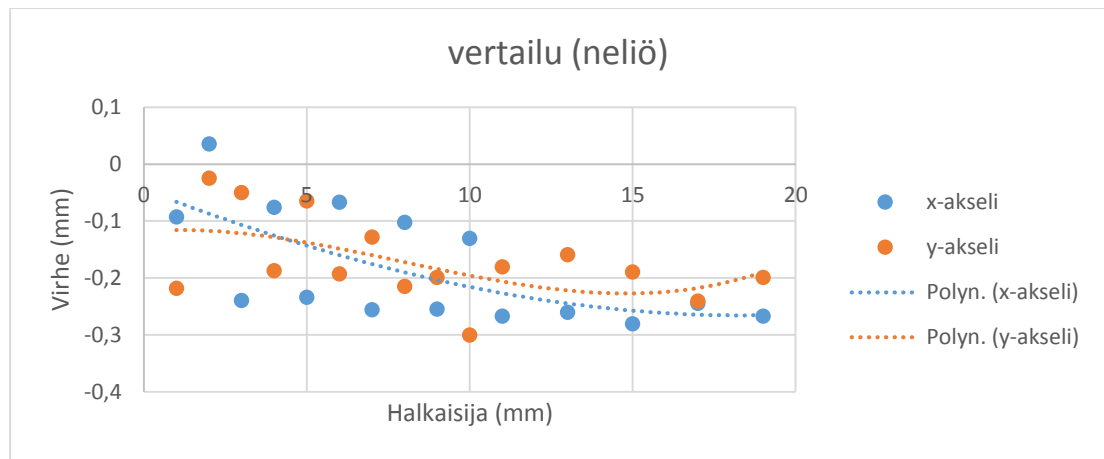
Kuvio 6. Pursotettujen ympyrä kappaleiden y-akselin virheet.

## 10.2 Sisämitat

Sisämittakappaleiden virheet ovat aina negatiivisia. Kappaleiden halkaisijoiden kasvaessa virhe pysyy usein samana. Y-akselin virhe on pääsääntöisesti suurempi kuin x-akselin.

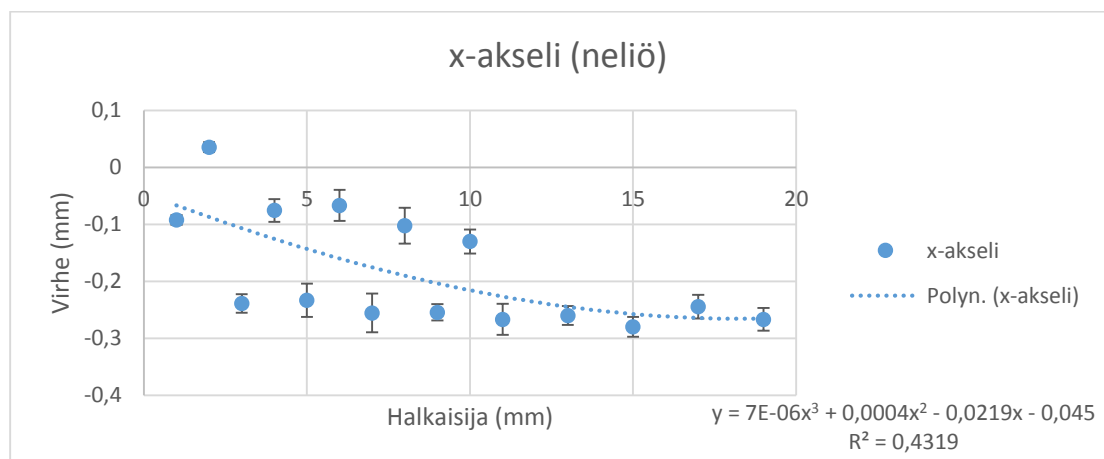
### 10.2.1 Neliö

Neliö kappaleiden hajontakuvioiden avulla muodostetut suuntaviivat muistuttavat toisiaan. Molemmilla akseleilla parilliset luvut ovat noin 0,1 millimetriä suuremmat. Parittomilla luvuilla trendiviiva olisi lähes suora -0,2 millimetrin arvolla. Y-akseli saa viiden millimetrin jälkeen suurempia virhe arvoja kuin x-akseli.



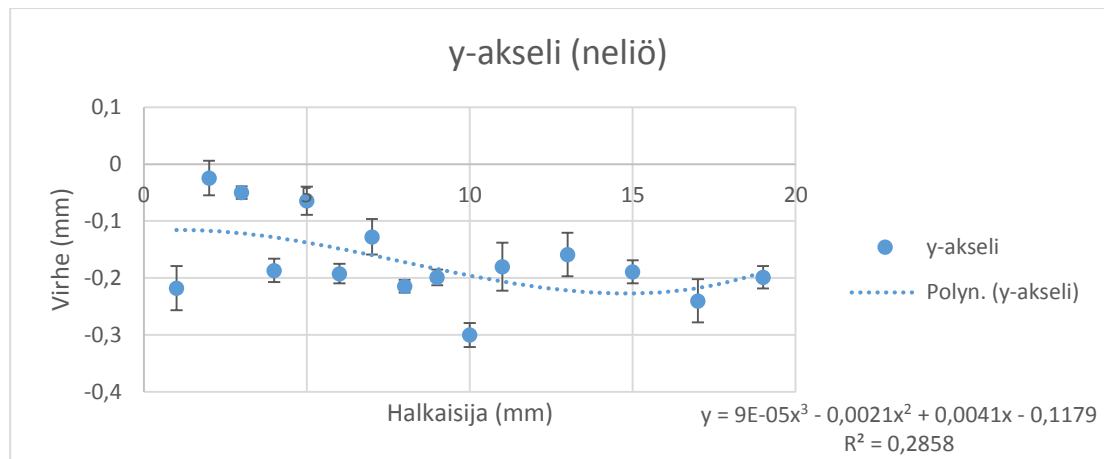
### x-akseli

X-akselin hajontakuviio on vaihteleva ensimmäisellä 10 millimetrillä. Keskihajonta on hajontakuviiossa tasaista. (kts. liite 2) X-akselin virheiden arvot ovat yhtä lukuun ottamatta negatiivisia. Korrelaatiokertoimen arvo on 0,43.



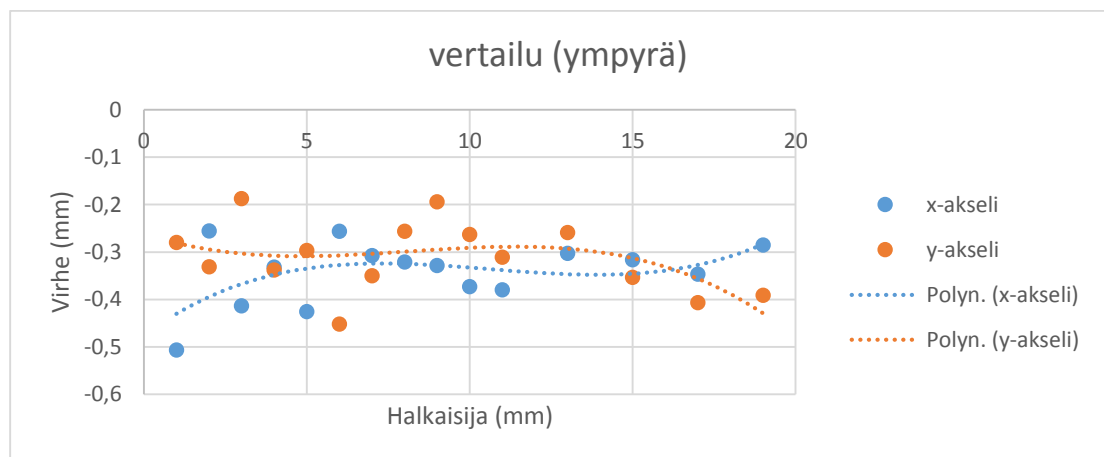
### y-akseli

Y-akselin hajontakuviio on vaihteleva ensimmäisellä 10 millimetrillä. Keskihajonta on hajontakuviiossa tasaista. (kts. liite 2) Y-akselin virheiden arvot ovat negatiivisia. Korrelaatiokertoimen arvo on 0,43.



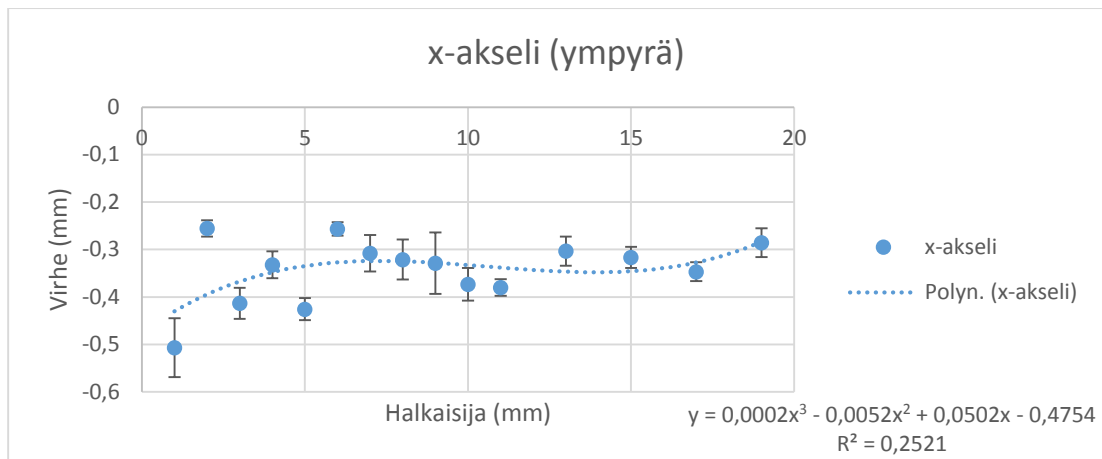
### 10.2.2 Ympyrä

Ympyrä kappaleiden hajontakuvioiden avulla muodostetut suuntaviivat ovat toisensa peilikuvia. Y-akselin arvot ovat kuitenkin lähes koko ajan suuremmat. Hajontakuvio on hajanainen mutta arvot ovat pääsääntöisesti -0,3 millimetrin ympärillä.



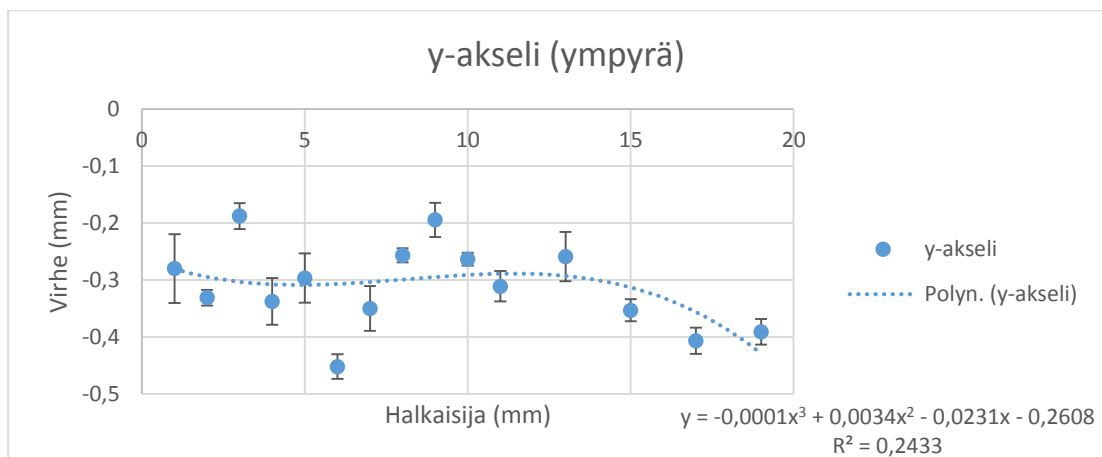
### x-akseli

X-akselin hajontakuvio on ensimmäisellä viidellä millimetrillä nouseva. Tämän jälkeen virheiden arvot pysyvät lähes samoina -0,3 millimetrin tuntumassa. Keskihajonta on hajontakuviossa tasaista. (kts. liite 2) X-akselin virheiden arvot ovat negatiivisia. Korrelaatiokertoimen arvo on 0,25.



### y-akseli

Y-akselin hajontakuviio on ensimmäisellä viidellätoista millimetrillä tasainen. Tämän jälkeen virheiden arvot lähtevät kasvamaan negatiiviseen suuntaan. Keskihajonta on hajontakuviiossa tasaista. (kts. liite 2) Y-akselin virheiden arvot ovat negatiivisia. Korrelaatiokertoimen arvo on 0,24.



## 11 Tulosten tarkastelu

Ulkomittakappaleiden virheiden ollessa tasaisesti laskevia sekä hajontakuvion saama korkea korrelaatiokertoimen arvo johti lineaarisen trendiviivan käyttöön. X- ja y-akselien erot ovat helposti selitettävissä hihnojen eri kireydellä mikä aiheuttaa hitaampaa liikettä ja näin enemmän virhettä. Ympyröiden ja neliöiden mittaerojen syytä on vaikea arvioida.

Sisämittakappaleiden vaihtelevat hajontakuviot ja pienet korrelaatiokertoimet johtivat valitsemaan kolmannen asteen polynomiviivan kuvaamaan. X- ja y-akseleissa näkyy edelleen y-akselin suuremmat arvot mutta poikkeuksiakin löytyy. Pienimpiä halkaisijoita oli todella vaikea mitata koska reiät olivat lähes ummessa. Työntömitan käyttäminen ei ollut paras vaihtoehto tässä tilanteessa.

Mittauksissa pyrittiin vähentämään mittausvirheitä tulostamalla kappaleet kolmeen kertaan ja mittaamaan jokainen kappale kolmeen kertaan. Näin pystyttiin luottamaan enemmän saatuihin tuloksiin. Keskihajonta kappaleiden välillä oli useimmiten pieni, mikä kertoo kappaleiden olevan lähes identtisiä. Kappaleita tulostaessa tämän pystyi näkemään että monet tulostusvirheet toistuivat täsmälleen samalla tavalla. Ongelmia mittaustilanteissa tuottivat tasaisen voiman hallinta mittauksissa sekä materiaalin elastisuuden aiheuttaman muutokset.

Tutkimuksen luotettavuutta heikentää tutkimuksen liian pieni halkaisijoiden määrä. Tuloksista ei nähdä lähtevätkö virheet tasaantumaan vai jatkavatko ne muuttumattomina. Lisäksi työssä ei tilastollisesti arvioitu luotettavuutta.

Tutkimus on helposti toistettava mutta tulokset varmasti vaihtelevat. Jokainen laite on yksilö ja käytön aiheuttama kulutus mekaanisissa osissa aiheuttaa erilaisia tuloksia. Myös muutokset materiaaleissa ovat mahdollisia samankin valmistaja osalta.

## 12 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Yksi selkeimmistä johtopäätöksistä on että kuluttajatason 3D-tulostimien tulostamat kappaleet eivät ole kovin tarkkoja eikä muutoksia ole helppo ennustaa tai ne eivät käyttäydy ennakoidusti. Prosessissa on paljon muuttujia joista vain yhden mittaaminen on vaikeaa.

Kuitenkin mittatarkkuutta 0-20 millimetrin välillä voidaan pitää riittävänä laitteiden yksinkertaisuuteen nähden. Laitteille voidaan tämän tutkimuksen osalta helposti arvioida mittatarkkuudeksi  $\pm 0,4$  millimetriä joka täyttää ISO 2768:n standardi erittäin karkea luokituksen v.

Toisena johtopäätöksenä voidaan pitää että alle kahden millimetrin kappaleita ei tulostaa näillä asetuksilla. Mittausvirheen suhteellinen osuus halkaisijaan on liian suuri. Tämän pystyi helposti toteamaan jo silmämääräisesti kun tulostettiin kappaleita. Alle kahden millimetrin tulosteet olivat usein vinoja tai leikkauspinnoilla pinnat eivät olleet suoria tai ympyräisiä.

Liitoksia suunniteltaessa pursotettaviin kappaleisiin pystytään helposti muuttamaan kappaleiden halkaisijaa sopivaksi jo suunnitteluvaiheessa. Leikattavien pintojen suunnittelu on selkeästi hankalampaa mutta parhaiten tullaan onnistumaan 3-15 millimetrin välillä.

## 13 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli arvioida materiaalia pursottavan laitteiston mittatarkkuutta sisä- ja ulkomittojen avulla erimuotoisten pienten kappaleiden avulla. Lisäksi haluttiin tutkia x- ja y-akselien mittojen eroavaisuuksia.

Mittatarkkuudeksi arvioitiin  $\pm 0,4$  millimetriä. Käytännössä tarkkuus on kuitenkin aina parempi koska pieniä mittoja harvemmin tulostetaan. Pienet mitat aiheuttivat tulosten positiivisien arvojen suuruutta. Y-akseli sai lähes aina suurempia arvoja kuin x-akseli. Poikkeuksia syntyi halkaisijoiden alku- ja loppupäässä.



Opinnäytetyö haki aihettaan kauan, ja sitä muutettiin useita kertoja hiukan toiseen suuntaan. Vaikka teoreettinen osuus säilyi lähes samanlaisena koko prosessin ajan, olisi aiheen valintaan käytetty aika tullut käyttää selkeämmin jäsennellyn raportin suunnitteluun ja luomiseen. Opinnäytetyön tekijälle tehty työmäärä ja prosessit ovat selkeinä mielessä mutta muille aiheesta kiinnostuneille raportin lukeminen on ainut tapa ymmärtää opinnäytetyötä ja selkeällä hyvin jäsennellyllä raportilla se on helpompaa.

Tietoperustan etsintä onnistui hyvin ja laadukasta tietoa saatiin paljon taustalle. Kirjoitettaessa ongelmaksi syntyi napakkojen kappaleiden luominen. Materiaali olisi mahdollistanut pidempien kappaleiden kirjoittamisen, mutta opinnäytetyö haluttiin pitää nappakana kokonaisuutena. Tämä johtikin usein liiankin tiiviisiin ja monimutkaisiin kappaleisiin.

Tutkimuksen suoritus onnistui hyvin ja tiedot saatiin talteen. Ongelmaksi osoittautui kuinka tulkita tuloksia. Erilaisia hajontakuvioita tehtiin ja niiden yhtenäisyyksiä yritettiin päätellä. Tuloksia tulkitessa alkoi vaikuttamaan siltä että tulokset eivät ole kovin luotettavia. Sisämittoja mitatessa parilliset luvut olivat parittomiin verrattuna eri kohdassa ja tulosten arvot olivatkin aivan erilaisia. Tähän käyttäytymiseen ei keksitty mitään syytä.

Tulosten avulla voidaan karkeasti arvioida kuluttajatulostinten tarkkuutta. Tulostinten rakenne ja elektroniikka ovat suurimmassa osassa laitteissa tällä hetkellä samanlaisia ja ohjelmistotkin ovat käytössä monella valmistajalla. Akseleiden käyttäytymistä ei voida yleistää muille laitteille vaan se on aina laitekohtaista ja laitteen kunnosta riippuvaista.

Jatkoa varten testiä voisi yksinkertaistaa koskemaan vain parittomia tai parillisia arvoja jotta pystytään mittaamaan myös suurempia halkaisijoita. Lisäksi leikattavien kappaleiden mittakappaleen suunnittelua tulisi muuttaa niin että kaikki mitattavat pinnat ovat samalla suoralla.

## Lähteet

3d printing, additive manufacturing industry expected to quadruple in size in four years. 2014. *Appliance Design*, 62(11)

Anderson, C. 2013. *Makers : The new industrial revolution*. London : Random House Business books.

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., . . . Salonen, P.,. 2014. *Koneenosien suunnittelu* / (6. uud. p. ed.). Helsinki : Sanoma Pro.

Boschetto, A., Giordano, V., & Veniali, F. 2013. 3D roughness profile model in fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal*, 19(4), 240-252.

Budinski, K. G., & Budinski, M. K. 2010. *Engineering materials : Properties and selection* (9th ed. ed.). Upper Saddle River, N.J. : Pearson.

Callaham, J. 2015. Microsoft will reveal info on new 3D printing file format during build 2015. Retrieved from <http://www.windowscentral.com/microsoft-will-reveal-info-new-3d-printing-file-format-build-2015-april-30>

Garlotta, D. 2001. A literature review of poly(lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 9(2)

Groover, M. P. 2011. *Principles of modern manufacturing : SI version* (4th edition ed.). Hoboken, NJ : Wiley.

Hausman, K. 2014. *3D printing for dummies*. New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated.

Heikkilä, M. 2012. Korutehdas siirtyy 3D-tulostukseen. *Metallitekniikka*, 3, 18.

Holopainen, M., & Pulkkinen, P. 2008. *Tilastolliset menetelmät* / (5. uud. p. ed.). Helsinki : WSOY Oppimateriaalit.

Horvath, J. 2014. In Lowman M. (Ed.), *Mastering 3D printing* Heinz Weinheimer.

Jaakkola, H. 2014. Paljon melua aiheesta. *Metallitekniikka*, 9, 20.

Kauppinen, V. 2014. Ihmisen osia konepajalta. *Metallitekniikka*, 2, 49.

Keinänen, T., & Järvinen, M.,. 2014. *Mittaustekniikka* / (1. p. ed.) Helsinki : Sanoma Pro.

Kira. 2015. Microsoft will reveal new 3D printing file formats during build 2015. Retrieved from <http://www.3ders.org//articles/20150426-microsoft-to-reveal-new-3d-printing-file-format-during-build-2015.html>

*Konepajan mittaustekniikka*. 1987. Helsinki : Metalliteollisuuden kustannus.

Lehtinen, K., & FIRPA. 2015. FIRPA:N materiaalia lisäävän valmistuksen sanasto. Retrieved from <http://www.firpa.fi/html/suomi.html>

Lehtinen, L. 2014. 3D-tulostus kehittyy ripeästi. *Muoviplast*, 3, 14.

Lipson, H., & Kurman, M. 2013. *Fabricated : The new world of 3D printing*. Indianapolis: John Wiley & Sons.

Mapal tekee pieniä porarunkoja 3d-tulostuksella. 2014. *Metallitekniikka*, 7-8, 66.

Paukku, T. 2013. *Kymmenen uutta ihmettä : Teknologiat, jotka muuttavat maailmaa*. [Helsinki] : Gaudeamus.

Shapeways. 2015. Thin walls tutorial. Retrieved from [http://www.shapeways.com/tutorials/thin\\_walls\\_tutorial](http://www.shapeways.com/tutorials/thin_walls_tutorial)

Stamford, C. 2014. Gartner's 2014 hype cycle for emerging technologies maps the journey to digital business. Retrieved from <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918>

Starr, M. 2015. World's first 3D-printed apartment building constructed in china. Retrieved from <http://www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/>

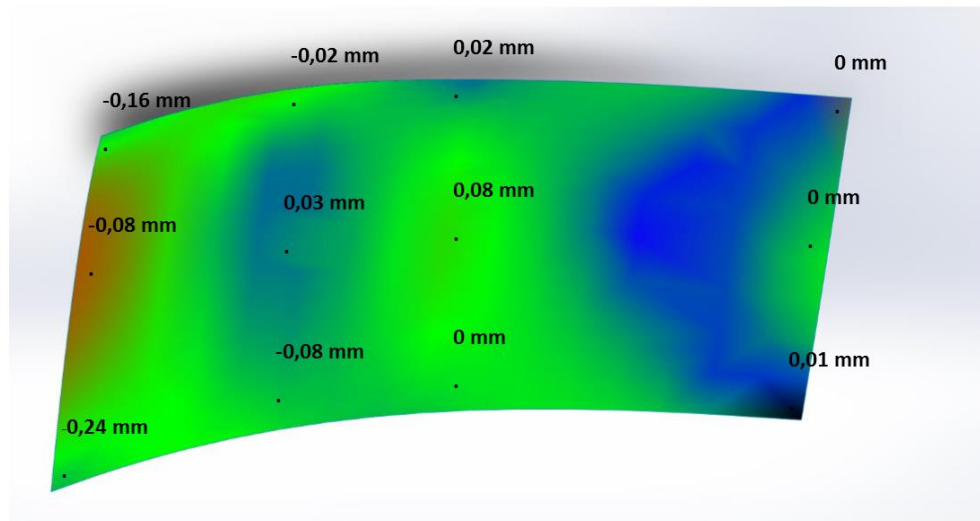
Turner, B., & Gold, S. 2015. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. materials, dimensional accuracy and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3) doi:<http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>

## Liitteet

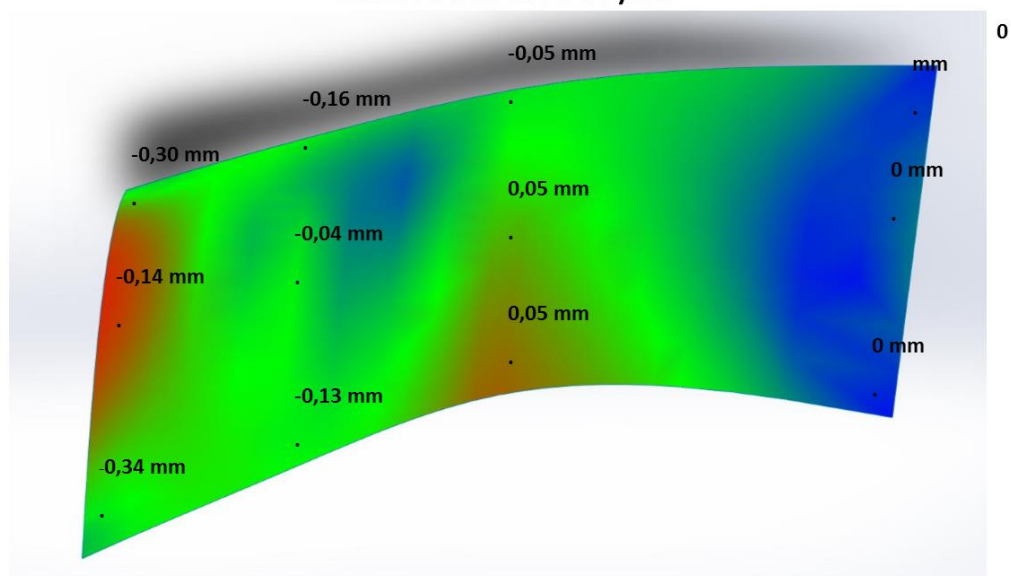
### Liite 1 Tulostusalustan kalibrointi

#### Tulostusalustan kalibrointi

##### kalibrointi metallialustalla



##### kalibrointi lasilevyllä



Tulokset ovat kalibroinnin jälkeisiä mittaustuloksia. Mittauspisteet sijaitsivat 90 mm välein jonka jälkeen mitattiin lisäpisteet vasemman reunan pisteiden ja keskimmäisten pisteiden puolivälistä. 0,0 piste sijaitsi oikeassa takakulmassa.

## Liite 2 Ulkomitat

Taulukko 1. Neliöprofiilin x-akseli

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	0,224	0,184	0,153	0,132	0,123	0,107	0,120	0,063	0,134	0,058
Keskihajonta	0,010	0,056	0,011	0,021	0,014	0,029	0,019	0,013	0,020	0,037

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	0,058	0,073	0,099	0,053	0,017	-0,011	-0,071	-0,019	-	-0,098
Keskihajonta	0,028	0,035	0,033	0,030	0,031	0,017	0,014	0,019	-	0,016

Taulukko 2. Neliöprofiilin y-akseli

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	0,341	0,132	0,124	0,200	0,100	0,167	0,200	0,159	0,137	0,153
Keskihajonta	0,011	0,025	0,015	0,022	0,009	0,014	0,054	0,015	0,018	0,026

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	0,138	0,086	0,134	0,067	0,042	0,058	0,003	0,036	-	-0,019
Keskihajonta	0,018	0,021	0,013	0,019	0,021	0,021	0,021	0,021	-	0,021

Taulukko 3. Ympyräprofiilin x-akseli

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	0,062	-0,060	-0,011	0,088	-0,039	-0,036	-0,073	-0,057	-0,057	-0,038
Keskihajonta	0,073	0,108	0,029	0,103	0,009	0,012	0,041	0,023	0,028	0,023

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	-0,069	-0,126	-0,100	-0,117	-0,122	-0,114	-0,176	-0,163	-0,211	-0,208
Keskihajonta	0,028	0,014	0,019	0,029	0,022	0,042	0,028	0,047	0,023	0,031

**Taulukko 4. Ympyräprofiilin y-akseli**

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	0,129	-0,011	0,131	0,020	0,034	-0,076	-0,036	-0,112	-0,016	-0,071
Keskihajonta	0,181	0,069	0,040	0,017	0,017	0,015	0,010	0,026	0,022	0,018

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	-0,046	-0,143	-0,082	-0,173	-0,048	-0,151	-0,168	-0,170	-0,212	-0,233
Keskihajonta	0,014	0,011	0,013	0,010	0,019	0,015	0,058	0,037	0,044	0,022

**Liite 3 Sisämitat****Taulukko 5. Neliöprofiilin x-akseli**

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	-0,092	0,036	-0,239	-0,076	-0,233	-0,067	-0,256	-0,102	-0,254	-0,130
Keskihajonta	0,008	0,009	0,016	0,020	0,029	0,027	0,034	0,032	0,014	0,021

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	-0,267	-	-0,260	-	-0,280	-	-0,244	-	-0,267	-
Keskihajonta	0,027	-	0,017	-	0,017	-	0,021	-	0,020	-

**Taulukko 6. Neliöprofiilin y-akseli**

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	-0,218	-0,024	-0,050	-0,187	-0,064	-0,192	-0,128	-0,214	-0,199	-0,300
Keskihajonta	0,039	0,030	0,011	0,021	0,025	0,017	0,031	0,011	0,014	0,021

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	-0,180	-	-0,159	-	-0,189	-	-0,240	-	-0,199	-
Keskihajonta	0,042	-	0,038	-	0,020	-	0,038	-	0,020	-

**Taulukko 7. Ympyräprofiilin x-akseli**

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	-0,507	-0,256	-0,413	-0,332	-0,426	-0,257	-0,308	-0,321	-0,329	-0,373
Keskihajonta	0,062	0,017	0,033	0,028	0,023	0,014	0,039	0,042	0,065	0,035

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	-0,380	-	-0,303	-	-0,317	-	-0,347	-	-0,286	-
Keskihajonta	0,017	-	0,031	-	0,022	-	0,020	-	0,030	-

**Taulukko 8. Ympyräprofiilin y-akseli**

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Virhe	-0,280	-0,331	-0,188	-0,338	-0,297	-0,452	-0,350	-0,257	-0,194	-0,263
Keskihajonta	0,061	0,014	0,023	0,041	0,043	0,022	0,039	0,012	0,030	0,011

	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Halkaisija	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Virhe	-0,311	-	-0,259	-	-0,353	-	-0,407	-	-0,391	-
Keskihajonta	0,027	-	0,043	-	0,019	-	0,023	-	0,023	-